معهد الانماء العربي



معجلات الجسيمات

د. محمد عزت عبد العزيز

١٩٨٢

حسين يوسف الكموشي
جامعة الفاتح - كلية العلوم
30.5.1984

معهد الإنماء العربي

حسين يوسف الكموشي

معجلات الجسيمات

تأليف وترجمة : د. محمد عزت عبد العزيز

المراجعة العلمية : د. إبراهيم فتحي حمودة

الجماهيرية العربية الليبية الشعبية الاشتراكية
طرابلس ـ ١٩٧٩ .

سلسلة كتب « التكنولوجيا النووية في البلدان النامية »

تصدر عن:

معهد الانماء العربي، برنامج العلم والتكنولوجيا
بيروت ـ لبنان

الطبعة الاولى بيروت ١٩٨٢

تقديم

هذا التقرير عن « معجلات الجسيمات » هو جزء من مشروع دراسة بعنوان « التقنية النووية والدول النامية » والذي أنجز بواسطة علماء ساهموا بإجراء دراسات مماثلة في مجالات أخرى رئيسية للتقنية النووية. وقد تم كل العمل داخل فريق التقنية النووية بمعهد الإنماء العربي الذي دعم المشروع.

إن أهداف مثل هذه الدراسات ومداها قد إتجهت بصفة رئيسية نحو توضيح الدور الذي تلعبه، والإحتياجات التي تتطلبها الدول النامية في المجالات البالغة التعقيد للتقنية النووية. لذلك فإن دراسة في معجلات الجسيمات يمكن أن تبدأ باستعراض للتقدم التكنولوجي الذي أحرز لتوه مع كل نوع من المعجلات، وباعتبار تطبيقات المعجلات في مختلف المجالات، وبمعالجة الجوانب البيئية والأمنية، فضلاً عن التطورات الاقتصادية والاستراتيجية، ثم تحليل قضية إحتياجات الدول النامية.

على أن إعداد تقرير مختصر يتناول كل هذه المشكلات في تقنية المعجلات والذي يتسم بتغطية شاملة لمختلف العلوم الفيزيائية والهندسية يعتبر مهمة شاقة. ومع ذلك فقد بذلت محاولة لتغطية المجالات المذكورة آنفاً ذات الصلة بمعجلات الجسيمات بأعظم ما يمكن من التركيز، مع الإشارة إلى المراجع المعنية فيما يتعلق بالتفاصيل. وفي أعقاب مثل هذا الإستعراض الموسع للجوانب

العديدة يقدم المؤلف وجهات نظره عن أهمية معجلات الجسيات وما تستطيع أن تفعله في الدول النامية. كذلك يقترح خطة تصورية لإدخال المعجلات في المجالات العلمية والتطبيقية بالدول النامية.

لقد إعتمد الكثير من مادة هذا التقرير على المصادر المختلفة للبحوث المنشورة.

كما **أُعطي** التنويه وذُكرت المراجع خلال متن هذا التقرير كلما دعت الحاجة إلى ذلك **ويُذكر** على وجه الخصوص بعض الأجزاء من كتاب « معجلات الجسيات » تأليف ام. اس. ليفينجستون، جي. آر. بليويت (١٩٦٢)، بإذن من شركة كتب « ماك جروهيل ».

قائمة المحتويات

المقـــدمـــة

تتسم « معجلات الجسيات » بأنها واحدة من تلك التقنيات التي تدمج الأفكار الفيزيائية والنظريات الرياضية مع الهندسة في أكثر مظاهرها تقدماً. إنها علم يشتمل على تقنيات متعددة تتآزر كلها سوياً لتكوّن في النهاية تركيباً على جانب من التعقيد بسبب الكمية الهائلة من المعدات ذات الوظائف المختلفة. ومع ذلك، فان المبادىء الأساسية للمعجلات مفهومة جيداً. وبالنظر إلى المدى الكبير للطاقة الذي تنتجه الأنواع المختلفة من المعجلات في الوقت الحالي فقد إكتسبت أهمية عظمى في عالم التقنية النووية. فلا تستخدم المعجلات كأدوات بحث أساسية في العلوم النووية فقط، ولكنها تُسخَّر كذلك في تطبيقات أخرى عديدة لها نفس الأهمية.

ما هو المعجل؟

المعجلات أجهزة لإنتاج حزم من أشعة الجسيات المشحونة التي إكتسبت طاقة ما ابتداء من آلاف قليلة من الفلط الألكتروني (إف)، صعوداً إلى ملايين قليلة، أو مئات الملايين، أو آلاف الملايين، أو حتى مئات الآلاف من ملايين الفلط الالكتروني.

ويُعرَّف الفلط الالكتروني (إف) على إنه الطاقة التي يكتسبها الالكترون عندما يقع خلال فرق جهد مقداره فلط واحد. وبدلالة وحدات أخرى

للطاقة يكون ١ (واحد) «إف» مكافئاً إلى ١ر٦٠٢٢ × $١٠^{-١٩}$ جول ، وكذلك ١ إف = $\frac{١٠^{-١٩}}{٢ر٦١٣}$ كالورى. ولما كانت وحدة القلط الالكتروني شديدة الصغر لتستعمل في المعجلات ، لذلك فمن المعتاد أن نستخدم: الكيلوڤلط الكتروني ١ (ك إف) = $١٠^{٣}$ إف ، والميجاڤلط الكتروني ١ (م إف) = $١٠^{٦}$ إف ، والبليون ڤلط الكتروني ١ (ب إف) = $١٠^{٩}$ إف.

وتقسم معجلات الجسيمات طبقاً للتبويبات الآتية:

(١) نوع المعجل ، أي الطريقة التي يتم بها التعجيل ، وفي هذا المجال يكون لدينا:

أ - معجلات التيار الوحيد الإتجاه مثل «الكوكروفت والتن» الفان دي جراف ، والمعجلات المتعاقبة.

ب - المعجلات الدورية ، مثل السيكلوترون ، البيتاترون ، السينكروسيكلوترون والسينكروترون.

ج - المعجل الخطي

د - المحطمات الذرية العملاقة الحديثة التي تتكون من مجموعة من المعجلات تتصل في تعاقب ، كل واحد منها يحقن حزمة أشعته في المعجل التالي.

(٢) كمية طاقة المعجل ، فالمعجلات الصغيرة تكون في العادة من نوع «التيار وحيد الإتجاه» وطاقتها قليل من مئات الكيلوڤلط ، ومعجلات للطاقة العالية ذات المدى المختلف ، والمعجلات ذات الطاقة المفرطة الإرتفاع. وعادة لا توجد خطوط حادة فاصلة لمجالات الطاقة المختلفة.

(٣) نوع الجسيمات التي تُعجّل ، فيوجد معجلات الالكترونات ، ومعجلات البروتونات ، ومعجلات الأيونات الثقيلة والأيونات العديدة الشحنة. بل يوجد كذلك معجلات الجسيمات المتعادلة ذات الطاقة المنخفضة.

(٤) كمية تيار حزمة الأشعة، وعادة ما يأتي ذلك بالإرتباط مع طاقة المعجل، فتيارات أشعة بالميكروأمبيرات عند الطاقات العالية، والملي أمبيرات عند طاقات متوسطة وتيارات بالامبيرات لبعض التطبيقات التي تستخدم معجلات منخفضة الطاقة كما في بحوث الإندماج النووي.

التطوير التاريخي للمعجلات:

لقد زودتنا العناصر المشعة طبيعياً مثل الراديوم والثوريوم بالمصادر المبكرة للجسيمات المشحونة ولأشعة جاما (γ). فهذه العناصر تقذف جسيمات ألفا (α) بطاقات تصل الى ٥ - ٦ م إف، جسيمات بيتا (β، الكترونات سريعة) بطاقات مقارنة، وأشعة جاما بطاقات تصل الى ٣ م إف. ولقد كانت هذه الجسيمات التي تنتج طبيعياً تدرس بادىء الأمر لتحديد طبيعتها الذاتية، ثم إستخدمت فيما بعد كقذائف تصدم المواد ذات الأنواع المختلفة من أجل دراسة كيفية تفاعلها مع العناصر.

ولقد كان هذا النوع الأخير من الفحص هو الذي قاد «راذرفورد» إلى إكتشاف نواة الذرة في عام ١٩١٩ عندما أقام الدليل على أن نواة النيتروجين يمكن أن تتحطم بواسطة جسيمات α الطبيعية الحدوث من الراديوم والثوريوم.

والجسيمات المتواجدة طبيعياً لها عدة عيوب، فهي ليست مجمّعة (متوازية) ولذلك فإن كثافتها ليست بدرجة القوة التي نحتاج إليها أحياناً، كماإنه لا يمكن التحكم في الكثافة أو الطاقة حسبما نرغب. وعلاوة على ذلك فإن شدتها محددة كما أنها تضمحل مع الزمن. ولقد شعر الفيزيائيون بالحاجة الملحة إلى مصادر إصطناعية تطلق جسيمات ذات طاقة عالية.

وفي العشرينات كان العلماء يحاولون التغلب على الصعوبات الناشئة عن تحديدات الفلطية (الفلط) العالية. وقد قامت الحاجة إلى مصادر الفلطية

العالية لاستخدامها خلال أنابيب التعجيل من أجل تعجيل الجسيمات المشحونة، وفي ذلك الوقت كانت الخبرة قد إكتسبت في مجالات الفلطية العالية من العمل على المجاهر الإلكترونية. على أن المحاولة الأولى الناجحة كانت في نشوء وتطوير أول معجل بواسطة «كوكروفت ووالتن» في مختبر كافنديش بكامبريدج حيث أعلنوا في عام ١٩٣٢ تحطيم الليثيوم بنجاح ببروتونات طاقتها ٤٠٠ ك إف.

وفي نفس المرحلة بالتقريب نجحت ثلاث محاولات في تطبيق مبادىء جديدة لتعجيل الجسيمات المشحونة. ففي عام ١٩٣٠ نجح فان دي جراف في إنشاء المولد**الالكتروستاتي** ذي السير المشحون حيث الشحنات التي تُؤيَّن وتُرش بواسطة نقاط «كورونا» المدببة على سير عازل متحرك تنقل لتشحن قطباً كروياً موصلاً إلى جهد مرتفع للتعجيل. وبسبب درجة ثباته العالية تميزت معجلات الفان دي جراف على جميع أنواع المولدات**الالكتروستاتية** الأخرى، فلقد ساهمت - ولا تزال تلعب دوراً بالغ الأهمية - في الفيزياء النووية.

وكانت المحاولة الناجحة الثانية في عام ١٩٣٢ عندما أثبت «ليفنجستون» مبدأ تعجيل الرنين في تجربة نموذجية في أعقاب اقتراح من لورانس، حيث تعبر الجسيمات فجوة موضوعا عليها جهد تعجيل منخفض نسبياً، فتتبع حركة نصف - دائرية في مجال مغناطيسي، وتعيد عبور الفجوة وتعجَّل مرة أخرى، ثم تتبع النصف الثاني للدائرة، وتتكرر الدورة عدة مرات في رنين مع المجال الكهربي المتذبذب الموجود خلال الفجوة. ويستمر ذلك إلى أن نحصل على الطاقة النهائية التي تكون أعظم بمراحل من الجهد الأقصى للفجوة. ويعرف هذا الجهاز بالسيكلوترون الذي عجل البروتونات عملياً لأول مرة الى ١٫٢٥ م إف.

وقد ارتكز التصور الثالث للتعجيل على اختراع معجل الحث المغناطيسي، أو البيتاترون، حيث الإلكترونات - التي تعمل كثانوي لمحول -

يتم تعجيلها بواسطة مجال كهربي مستحث بالفيض المغناطيسي المتغير الذي ينتج بواسطة ملفات أولية ليزاوج مسار الالكترونات. وقد تمكن « كيرست » في عام ١٩٤٠ من تعجيل الالكترونات الى طاقة ٢٫٣ م إف في أول نموذج صغير للبيتاترون.

ومن الطبيعي أن كل هذه الأنواع من المعجلات قد تدرجت خلال سلسلة سريعة من التطورات التي قادت إلى المعجلات ذات الطاقة الأعلى. ومع ذلك فقد كان هناك على الدوام حدود للطاقة القصوى التي يمكن التوصل اليها في كل نوع، وتُؤسَّس مثل هذه الحدود اما على قيود فيزيائية أو هندسية أو إقتصادية. وسوف نفصِّل هذا في الأبواب القادمة.

المعجلات المتزامنة:

كانت المرحلة المهمة التالية لتطوير المعجلات هي اكتشاف مبدأ « ثبات الطور » في عام ١٩٧٤ بواسطة « فيكسلر » في الاتحاد السوفييتي و« ماكميلان » في أمريكا كلٌّ على حدة. وهذا المبدأ الذي أدى الى اختراع السينكروسيكلوترونات والسينكروترونات يقرر أن الجسيمات المشحونة التي تُعجَّل عبر سلسلة من الفجوات بواسطة مجال كهربي متردد تكون مستقرة الطور. وهذا يعني أن يتم ضبط اتساع الفجوة والتردد وشدة المجال الكهربي بحيث أن الجسيم ذا الطاقة المحددة والذي يصل الى فجوة معينة عند طور محدد ومتوازن لمجال التعجيل سوف يصل الى الفجوة التالية عند نفس الطور. والآن، لو وصلت جسيمات بالطاقة الصحيحة الى الفجوة عند طور غير صحيح في جوار طور التوازن، فإن هذه الجسيمات ستلاقي تصحيحاً تلقائياً نحو الطور الصحيح عند الفجوات المتتالية.

وعلى وجه العموم، فان الجسيمات ذات الأخطاء الطفيفة سواء في الطور أو في الطاقة، سيستمر تعجيلها بذبذبات بسيطة في الطاقة والطور حول الطاقة

الصحيحة والطور المتوازن. ولقد أعطى البرهان الرياضي على هذا المبدأ[1] الذي وجد أعظم تطبيقاته أهمية في ثلاثة أنواع للمعجلات هي: المعجل الخطي، والسينكروترون، واليسنكروسيكلوترون. والأجهزة التي تعمل بمبدأ «ثبات الطور» تعرف بالمعجلات المتزامنة أو «المستقرة الطور». وهي ذات سمة مشتركة حيث أن الذبذبات المستقرة تحدث في الطور الذي يتم عبور فجوة التعجيل عنده، فالجسيمات تبقى في تزامن مع المجالات المتذبذبة الى أن تصل الى الحدود الطبيعية للمجالات الموجهة والمعجّلة.

ومن حيث المبدأ يكون من المستطاع استمرار التعجيل في المعجلات المتزامنة الى طاقات عالية بدون تحديد، الا انه في ضوء التقنية الحالية، فإن الإعتبارات الاقتصادية هي التي تضع الحدود العليا للتعجيل ليس إلا.

ومن بعض الأمثلة للطاقات العالية التي تم التوصل اليها في السينكروترونات:

سينكروترون البروتونات بطاقة ٢٨ ب إف في «سيرن» بسويسرا الذي استكمل في عام ١٩٥٩ وسينكروترون للبروتونات ٣٣ ب إف في عام ١٩٦٠ «بمعمل بروك هافن القومي» بأمريكا، وكلا المعجلين يستخدمان مبدأ «الميل المتردد» (إي.جي.إس AGS) للتركيز المغناطيسي الذي يقلل حجم وتكاليف المغناطيسيات للمعجلات الدائرية حتى يصير المدى الأعظم ارتفاعاً للطاقة مجدياً من الناحية الاقتصادية. وهناك سينكروترون آخر يستغل درجة ميل الصفر والتي تعرف بـ (زي جي اس ZGS) يتميز بشدة أعظم ارتفاعاً لحزمة الأشعة ويعطي بروتونات بطاقة ١٢ ب إف، وقد بدأ عمل هذا المعجل حوالي عام ١٩٦٣ بمعمل أرجون القومي بأمريكا.

معجلات الطاقة الفائقة الإرتفاع:

ما زالت هناك مرحلة أخرى لتطوير المعجلات، تلك هي الفئة الجديدة من

معجلات الطاقة الفائقة حيث تصل الطاقة الى قيم شاهقة الارتفاع. فمحطم « فيرميلاب »[٢] يعمل منذ عام ١٩٧٣، ويعطي حزمة من أشعة البروتونات طاقتها ٥٠٠ ب إف ويتكون من أربعة معجلات متتالية: حاقن أيونات طاقته ٠٫٧٥ م إف يعقبه معجل **خطي** طاقة ٢٠٠ م إف يقذف حزم أشعته في سينكروترون من نوع « اي جي اس » معزّز، يرفع طاقة حزم الأشعة الى ٨ ب إف وأخيراً تحقن هذه الأشعة البروتونية في حلقة السينكروترون الرئيسي الذي يعجل حزم الأشعة إلى طاقة نهائية ٥٠٠ ب إف. ولا تزال تجري تطويرات أكثر على هذا المحطم النووي العملاق لتنفيذ ما يسمى: مضاعف/مقتصد الطاقة لرفع طاقة حزم الأشعة الى ١٠٠٠ ب إف، وبهذه الأشعة ذات الألف ب إف لا تزال هناك الطموحات المثيرة للإعجاب في « فيرميلاب » والتي تهدف الى بناء جهاز الأشعة المتصادمة ١٠٠٠ ب إف على ١٠٠٠ ب إف[٣] مستغلة الميزة العظمى لحزم الأشعة المتصادمة، والتي لا يمكن إنجازها في نظام الهدف الثابت إلا باشعة طاقتها أكثر من ٢ × ١٠^٦ ب إف بدلا من الألف ب إف في نظام الأشعة المتصادمة.

لماذا طاقات أعلى؟

إذا اعتبرنا حزم الأشعة المعجلة على أنها مكافئة للمجهر، بمعنى أنها « تنظر » بحزمة أشعتها داخل ذرات الهدف وتتداخل مع تفاصيلها وهي بهذا تعطي معلومات عن تركيبها، فإن ذلك يقودنا الى أن نعتبر مظهر « الكتلة ـ الموجة » الثنائي للجسيمات المعجلة. والآن، فإنه بالنسبة الى المجهر البصري تستخدم فوتونات الضوء المرئي لتحليل تفاصيل الى درجة ميكرون واحد داخل العينة المستخدمة، وسبب ذلك أن طول موجة الفوتونات يكون بالتقريب قلة من أعشار الميكرون. ومع ذلك، فإن الالكترونات المعجلة في المجهر الالكتروني بما لها من مظهر « الموجة ـ الكتلة » الثنائي يكون لها طول

الموجة المناسب والمساوي إلى $\frac{هـ}{ز ك}$ ، حيث ز = سرعة الالكترون، ك كتلته، هـ ثابت بلانك.

وبناء على ذلك فإن الجهر الالكتروني يقدر على تحليل تفاصيل الى درجة قلة من عشرات الانجسترون. وعلى هذا الأساس فإن الالكترونات التي تُعجل الى طاقة قدرها قليل من الكيلوفلط الالكتروني، أو فوتونات ذات أطوال موجة صغيرة (الأشعة السينية) يمكن أن تستخدم في فحص التركيب النووي الجزيئي للمادة بتفاصيل الى درجة قلة من الانجستروم.

والآن، بما أن نويّات (نيوكليونات) الذرة يكون قطرها حوالي ١ ف (فيرمى)(*)، والنواة ذاتها يكون قطرها قلة من الفيرمى، وعليه فان الجسيمات المعجلة التي تخترق النوى والتي تقذف لفحص النويّات يجب أن يكون لها أطوال موجات قصيرة بالدرجة التي تناسب هذه الأبعاد النووية، بمعنى أن طاقة الجسيمات يجب أن تكون عالية بما فيه الكفاية. ويعني هذا أن اكثر من ١٠٠ م إف تكون لازمة في حالة معجلات البروتونات لدراسة النوى، كما أن الطاقة اللازمة لفحص النوويات هي عدة بليونات من الفلط الالكتروني.

لعل ذلك هو السبب في أن الفيزياء النووية والدور الحاسم الذي لعبته في العلوم النووية تدين بتقدمها السريع للمعجلات. فدراسات الخواص الأساسية للنواة الذرية، والقوى التي تهيمن على التداخلات بين الجسيمات النووية، وتركيب القوى النووية، والأنماط التفاعلية، ونواتج التفاعل التي تنشأ عن الجسيمات النووية و/أو أنظمة الجسيمات النووية التي ترغم على الإصطدام مع بعضها البعض، وكذلك عمليات التشتتات المرنة وغير المرنة ـ كل هذه ما هي إلا بعض من أمثلة لا تحصى ولا تعد من مشكلات الفيزياء النووية التي تدرس

(*) يعبر عن الأبعاد النووية الصغيرة جداً بدلالة وحدة للطول تسمى الفيرمى (ف)، حيث ١ف = ١٠$^{-١٥}$ متر.

بواسطة المعجلات. ولقد صارت المعلومات التي تجمع والاكتشافات التي تنجز في مجال الجسيمات الأولية مشوقة أكثر وأكثر بتواجد معجلات الطاقة الفائقة الارتفاع. وعلى الأخص فان اكتشاف الميزونات والهيبرونات والعديد من الجسيمات الأخرى الغريبة « قصيرة العمر »، وكذلك نشوء تصورات ونظريات جديدة عن القوى النووية قد بررت كلها الحاجة المستمرة لطاقات أعلى.

أهمية المعجلات في التقنية النووية:

إن لكل نوع من المعجلات دوره الذاتي في البحث و/أو التطبيقات الأخرى بما يتوقف على طاقته ونوعه وخواص حزمة أشعته. فبالاضافة الى مجال الفيزياء النووية والطاقة العالية التي تمثل تحديات حقيقية، إجتذبت المعجلات العلماء الى مجالات البحث العديدة في الفيزياء الذرية وفيزياء الجوامد والفيزياء الاشعاعية. إن التبريد الالكتروني قد أقيم الدليل عليه تجريبياً في « نوفوزيبرسك » وتبريد مضاد البروتونات في « سيرن » و« فيرميلاب »[٤].

التشعيع بواسطة المعجلات:

يوجد الكثير من التطبيقات الأخرى للمعجلات التي سيتناولها الوصف التفصيلي في متن هذه الدراسة، وسيقتصر هنا فقط على مسح مختصر.

لقد وجدت المعجلات مجالاً واسعاً كمصادر إشعاعية وذلك فيما يتعلق بتطبيقاتها في الطب والصناعة والهندسة والصيدلة والكيمياء النووية، وجميع المجالات الأخرى حيث تثبت المعالجة الإشعاعية أنها فعالة وإقتصادية. فالنظائر المشعة « الطويلة العمر » التي تنتج في المفاعل ليست في أغلب الأحيان أفضل ما يناسب بعضا من هذه التطبيقات. ذلك أن « عمرها النصفي » الطويل يمكن أن يؤدي الى التلوث ومخاطرات التدمير، وهي لا تسمح باختبارات متكررة على فترات زمنية قصيرة، كما أن الإشعاع المنبعث يكون له خواص طبيعية غير مرغوب فيها. والمعجلات يمكنها إنتاج تشكيلة

واسعة من النظائر ناقصة النيوترونات باختيار كبير للأعمار النصفية والكثير منها يكون باعثاً للبوزيترونات التي يسهل الكشف عنها. هذا، ويمكن أن تستخدم بعض النظائر المنتجة في المعجلات في التجارب التي تقتضي استخدام اثنين من النظائر مقتفية الأثر ذات العمر القصير والطويل حيث أن خواصها الإشعاعية تعتبر في الغالب أفضل بكثير من النظائر المنتجة في المفاعلات، ويستعمل حالياً أكثر من مائة طريقة مختلفة. على أن أفضل استخدام يكون في الطب حيث يستفاد بالنظائر المنتجة في المعجلات في دراسات وظيفة الرئة، وقياسات سريان الدم، وتقديرات المياه في الرئتين، ودراسات الكبد والكلي، وتمركز أورام المخ، ومشاكل أخرى كثيرة.

أما بعض التطبيقات الصناعية النموذجية فهي: قياس التآكل بادماج مواد مرقومة في الأجزاء المتحركة، عمليات التصنيع حيث لا يتوفر شيء آخر سوى العناصر المرقومة مثل الكشف عن التسرب للأجهزة المغلفة، وصهاريج التخزين، والكابلات تحت الأرض أو المواسير.

أما أسلوب تقنية التحليل التنشيطي المستخدم للنيوترونات السريعة المنتجة في المعجلات فإنها تستعمل كبديل للوسائل الأخرى نظراً لأنها قادرة على الكشف عن كميات صغيرة للغاية للمواد وذلك في تجارب سريعة وغير تخريبية كما أنها يمكن أن تستخدم في بدء تطور ما. بل من الممكن أن نحلل الظواهر السطحية بواسطة التشعيع النيوتروني حيث تستطيع النيوترونات أن تخترق معظم المواد بسهولة، أو بواسطة حزم أشعة الجسيمات المشحونة من المعجلات.

ويوجد تشكيلة واسعة من التطبيقات في مجال قياسات كمية الشوائب في الفلزات، وفي التحليلات الطبية، كما أن هناك إقتراحات عن تحليلات «في موضعها الأصلي» على سطح القمر.

والنيوترونات ذات الطاقة المتغيرة ـ مثلما يمكن الحصول عليها حالياً

إقتصادياً وبسهولة من المعجلات ـ تجد نطاقاً واسعاً للغاية في البحث والتطبيقات فهي تتفاعل مع النّوى عند جميع مستويات الطاقة لأنه لا يوجد « عائق كولوم » المطلوب التغلب عليه ، ولكن إختيار طاقة النيوترون يعتبر وسيلة قوية للتفرقة بين تفاعل مميّز وتفاعل طفيلي.

ومن ناحية أخرى فإن التحليل التنشيطي باستخدام الجسيمات المشحونة يدين بأهميته الى الاختراق الصغير للجسيمات المشحونة والذي يجعل تحليل الأسطح مستحيلاً بأي وسائل أخرى. وبعض التطبيقات في هذا المجال هي: تحليل جميع المواد المستخدمة في الأفلام الرقيقة كما في صناعة أشباه الموصلات ، تحليلات آثار العناصر الخفيفة في المعادن ، قياس محتوى الرصاص في الشهب بحساسية ١٠-٩ ، ومحتوى البورون في السيلنيوم. كما أن الكثير من التطبيقات الأخرى في البيولوجيا تستخدم التنشيط بالبروتونات. وعلاوة على ذلك فإن تطبيقات الجسيمات ذات الطاقة من المعجلات تجد مجالاً واسعاً للاستخدام في التصوير والعلاج بالأشعة.

الإستخدامات الحديثة للمعجلات:

إن استخدام المعجلات في العلوم النووية والتقنيات الأخرى قد أكد على أهميتها في تقدم التقنيات الحديثة ، فحزم الأشعة المعجلة للجسيمات الكثيفة المتعادلة تحقن في البلازما الحلقية (ذات المجال المقفل) لتزود تسخيناً إضافياً للبلازما ، وفي مفاعل « توكاماك الإختباري للاندماج[٥] سوف يحقن أكثر من ٢٠ ميجاوات من القدرة الكهربية النابضة من حزمة أشعة الديتيريوم ، هذا بالاضافة إلى أن حزم أشعة الايونات الجزيئية ذات التيار الكبير تحقن من معجلات الطاقة المنخفضة في بلازما المرايا المغناطيسية[٦]. ولقد أجريت دراسات عديدة مستخدمة حزم أشعة الأيونات المعجلة لبدء احتراق نووي حراري ضخم في كريّات تحتوي على مخلوط « الديتيريوم ـ التريتيوم » وذلك من

خلال المحاولات المستمرة لتحقيق الظروف الفيزيائية للاندماج .

والإقتراح الآخر المثير عن استخدام معجلات الطاقة العالية يكمن في معجل التوليد الذي يجتاز الآن دراسات تصميم مركزة . ففي هذه الحالة تستخدم حزم أشعة البروتونات أو الديوترونات (أحد الأمثلة معجل بروتونات بطاقة ١ (واحد) ب إف وتيار ٣٠٠ ملي أمبير) وذلك لتحويل المادة الخصبة ثوريوم ـ ٢٣٢ أو يورانيوم ـ ٢٣٨ الى يورانيوم ـ ٢٣٣ أو بلوتونيوم ـ ٢٣٩ بالإستفادة بالشظايا النيوترونية التي تنتج في المعجل . وقد كان التطبيق الأول لهذا المفهوم « معجل إختبار المواد » في مختبر « لورانس ـ ليفرمور » (١٩٤٩ ـ ١٩٥٤) المستخدم لانتاج بلوتونيوم ـ ٢٣٩ على أوسع نطاق من أجل برنامج الأسلحة النووية . والأمر الأعظم تشويقاً هنا هو أن معجل ـ التوليد للبروتونات ٣٠٠ ملي أمبير وطاقة ١ (واحد) ب إف[٨] قد ينتج أكثر من ١٠٠٠ كيلوجرام في السنة من يورانيوم ـ ٢٣٣ أو بلوتونيوم ـ ٢٣٩ ، وهذا يزود وقوداً كافياً لدعم مفاعلات تقليدية ذات قدرة ٣٠٠٠ الى ٦٠٠٠ ميجاوات كهرباء ، بما يتوقف على دائرة الوقود والنوع المختار للمفاعل . لا شك أن التنفيذ الناجح لمثل هذه المشروعات سوف يؤدي بالتأكيد الى حل مشكلاتنا الخاصة بالوقود النووي . وعلاوة على إنتاج الوقود ، فان القدرة العالية لأشعة البروتونات ـ وهي ٣٠٠ ميجاوات في المثل الذي لدينا[٨] ـ تتحول في الهدف الى حرارة . وهذا ، بالاضافة الى الحرارة الناتجة من النيوترونات المتعاقبة ، يقدر بحوالي ١٢٠٠ ميجاوات حراري تكون متاحة لاستعادتها لانتاج قدرة كهربية يمكن بدورها أن تُستخدم في تغذية مرتدة لتمد المعجل بالقدرة اللازمة .

إن هذه التطبيقات تعطي المعجلات مظهراً جديداً وجذاباً للتقنية النووية بما يمتد باستخداماتها من الطراز التقليدي للفيزياء النووية والبحوث الأخرى والتطبيقات الى مساهمات ذات شأن تُقدِّم لحل مشاكل الطاقة . ويتبقى بعد ذلك أن نأخذ في الاعتبار المشكلات الاقتصادية الهامة التي تحتوي على كل من

استثمارات رأس المال وتكاليف التشغيل المحتواة في مثل هذه التطبيقات الجديدة المثيرة لمعجلات الطاقة العالية .

المراجع

١ - «Particle Accelerators», Livingston, M.S. and Blewett, J.P. McGraw Hill, 1962.

٢ - «Operating Experience with the Fermilab 500 - Gev Accelerator», Urban, G.S. and Gannon, J.C. IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS - 24, No. 3, June 1977.

٣ - «POPAE - A 1000 Gev on 1000 Gev Proton - Proton - Colliding Beam Facility» Ayres, D. and others, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS - 24, No. 3, June 1977.

٤ - Paper M5, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS - 24, No. 3, June 1977.

٥ - «Tokamak Fusion Test Reactor» Reference Design Report, PPPL - 1312, Ph - R - 004 (Nov. 1976), Princeton University, Plasma Physics Lab, Princeton, N.J.

٦ - «Heavy Ion Accelerators and Storage Rings for Pellet Fusion Reactors» Martin, R.L. and Arnold, R.C., RLM/RCA - 1 February 1967, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, USA.

٧ - «The Accelerator - Breeder, An Application of High - Energy Accelerators to Solving Our Energy Problems», Grand, P. and Others, IEEE Trans. Nucl. science, Vol. NS - 24, No. 3, June 1977.

الباب الأول

تقنية المعجلات وتطويرها

لعل أفضل توضيح للتقدم الهائل الذي تحقق في تطوير المعجلات يمكن تقديمه بأن نأخذ في الاعتبار الأنواع المعروفة المختلفة لمعجلات الجسيمات وأن نصف باختصار نظرية ومبدأ تشغيل كل منها، مظهرين التحسينات والتطويرات التقنية التي نتج عنها نشوء أجهزة حديثة، كما نبين العوامل التي تحدُّ من أي زيادة اضافية في طاقة أي نوع خاص. وهذا التسلسل في معالجة معجل بعد آخر سيأتي بالتقريب متفقاً مع نظام اختراع يتلو اختراعاً، وهو ما يمكن اعتباره نفس نظام التطوير، ونفس نظام زيادة الطاقة في المعجلات.

وسوف يُلاحظ أن نظرية تعجيل الجسيمات قد بُنيت على أسس نظرية وثيقة الصلة بديناميكية الجسيمات بصفة عامة وتفاعل المجالات الكهربية والمغناطيسية مع حركة الجسيمات، ونظرية البصريات الالكترونية وتركيز الجسيمات. وتُعتبر المعالجة التفصيلية لمثل هذه المشاكل خارج نطاق هذه الدراسة، إذ أن الاستنتاجات والمبادىء المتعلقة بمثل هذه الاعتبارات النظرية هي وحدها التي ستقدم، وذلك بالقدر الذي يكون كافياً لفهم مبادىء توليد الطاقة.

أما فيما يتعلق بتقنية المعجلات، فهي مبنية بصفة رئيسية على التعاون الفعال بين الفيزياء في صورها المتقدمة والهندسة في مجالات تخصصها المتعددة. وهذا التعاون قد وصل بتقنية المعجلات الى أعلى مستوى للتطوير مع

إختراعات مبتكرة في مجالات الالكترونيات والتفريغ العالي والمغناطيسيات والعدسات الالكترونية والموجات المتناهية الصغر ، والهندسة الميكانيكية ، والمواد العازلة ، ومفرطات الموصِّلية ، وتطوير الآلات وصنعها واستخدامها ، وهذه ما هي الا مجرد أمثلة.

ومرة أخرى ، فإننا سنتحاشى الدخول في غمار التفاصيل ، وانما سنقتصر على تقديم وتوضيح الانجازات التقنية التي نتجت عنها المعجلات الحديثة.

١ ـ أ معجلات التيار وحيد الاتجاه

تشمل هذه الفئة جميع أنواع المعجلات التي تكتسب الجسيمات فيها طاقتها بأن تقع خلال جهد كهربي وحيد الاتجاه ، وفي هذه المجموعة من معجلات التيار وحيد الاتجاه فان المعجلات الأكثر أهمية هي مولد كوكروفت ووالتن المتعاقب ، ومولد فان دي جراف الالكتروستاتي ، وأنواع أخرى يمكن اعتبارها نسخاً معدلة من هذين الاثنين.

ويوجد مولدات فلطية عالية أخرى أقل أهمية لن تؤخذ في الاعتبار هنا ، مثل مولدات التيار المفرط الارتفاع(surge generator) ، ومحول التعاقب وملف تسلا ، وهي لم تكن مرضية لأنه لا يستطاع التحكم في جهدها الكهربي بدقة كافية.

١ ـ أ ـ ١ مولد كوكروفت ووالتن المتعاقب

ان النوع المبكر لمعجل كوكروفت ـ والتن (ك ـ و) والذي أمكن بواسطته توليد تفاعل نووي ، يتكون من مصدر الكترونات يؤين ذرات الايدروجين لانتاج البروتونات ثم تعجل هذه البروتونات في فرق جهد قدره ١٥٠ كيلوفلط لتصطدم بهدف من رقاقة رفيعة من الليثيوم (شكل ١ أ ١). ويحدث التفاعل التالي :

$\text{يد}_{1}^{1} + \text{لث}_{3}^{7} \longrightarrow \text{هـ}_{2}^{4} + \text{هـ}_{2}^{4}$ ،

حيث تطلق جسيمات α بطاقة قدرها $\frac{1}{2}$ ٨ م إف

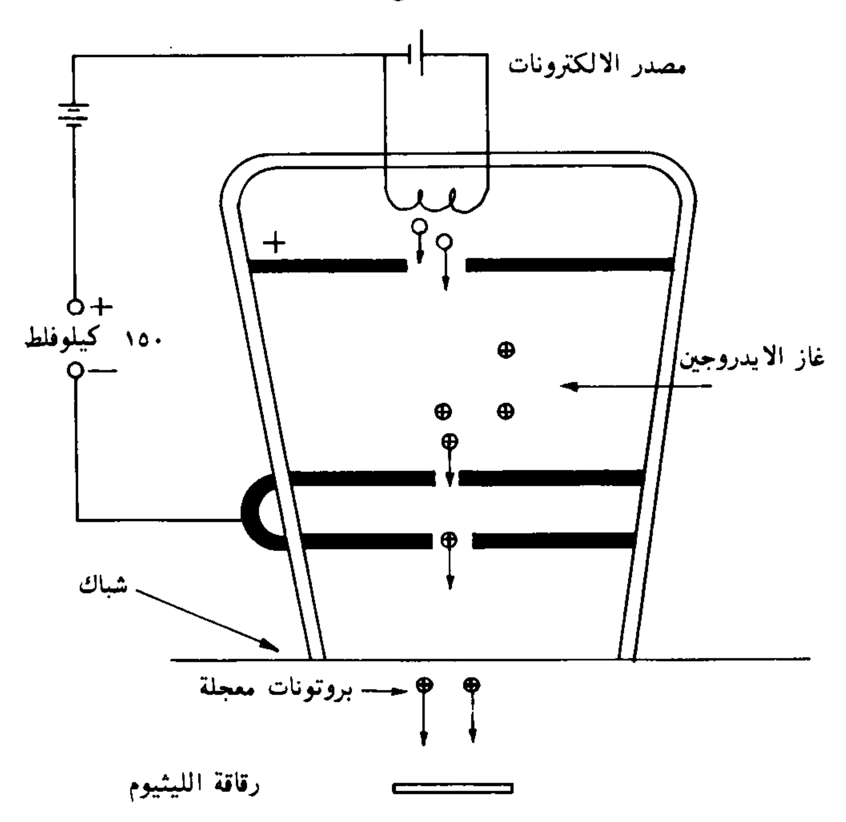
ولقد تأكدت نظرياً هذه النتيجة التجريبية الناتجة من أول معجل جسيمات ناجح بواسطة حساب ما يسمى « قيمة كيو » (Q - value) ، وهي ما تعبر عن الفرق بين مجموع الطاقة الحركية للجسيمات الخارجة من التفاعل والطاقة الحركية للجسيمات الداخلة في التفاعل التي اكتسبت بواسطة كل من الجزيئين ، وذلك بالطريقة البسيطة لتطبيق معادلة صيانة « الكتلة ـ الطاقة » على التفاعل السابق .

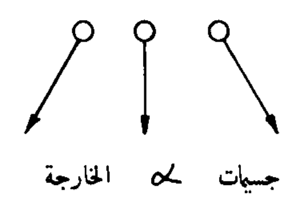
وبعد هذا الانجاز مباشرة تمكن كوكروفت ووالتن من ادخال أول تطوير على معجلهم باستخدام مبدأ مضاعفة الفلطية فيما يسمى المولد المتعاقب : فيقوم محول للفلطية المرتفعة بشحن مجموعة مكثفات على التوازي ، كما تعمل مجموعة من مقومات التيار ذات الصمامات بتفريغها على التوالي . ووضعت الفلطية العليا ٧٠٠ كيلو ڤلط على أنبوبة مفرغة حيث عجلت البروتونات الى ٧٠٠ ك إف (شكل ١ أ ٢)[١] .

ولقد ووجهت بعض الصعوبات في تطوير أنبوبة التعجيل حيث تكتسب الأيونات طاقتها بعبور فجوتين على مرحلتين . ولقد تبعت تطورات اضافية معجل كوكروفت ـ والتن ذا ٧٠٠ ك إف ، فأقيم معجل ١٫٢٥ م إف بواسطة كوكروفت ووالتن في معمل كافندش كما صنعت عدة معجلات أخرى واستخدمت في مختبرات متعددة ، لدرجة أن تنظيم أجزاء المعجلات صار قياسياً في الغالب حيث تصفف المكثفات في عمودين رأسيين يتوّجها نهاية كبيرة مستديرة . وتقع مقومات التيار في خط متعرج (zig - zag) بين صفوف المكثفات . وغالباً ما يضاف صف آخر لمكثفات الترشيح التي تقلل الفلطية وذلك في ترتيب رأسي . وفي هذه التنظيمات تكون أنبوبة التعجيل من النوع

شكل (١ ـ أ ـ ١)

أول جهاز تعجيل ناجح كوكروفت ووالتن





الرأسي ، وتؤخذ حزمة الأشعة الأيونية الى أسفل خلال أرضية المختبر الى المنطقة التجريبية على الدور الأسفل للمختبر.

أما القيمة النظرية القصوى للفلطية التي نحصل عليها من مولد التعاقب فتتوقف بصفة رئيسية على العدد الكلي للمكثفات (= العدد الكلي للمقومات) ، وليكن « ن » وهذا **يعطي** عامل تضاعف الفلطية الخارجة ، ن ، اذا لم يعجل التيار . على أنه اذا تم تحميل المعجل بتيار « ت » ، عندها ستكون الفلطية الخارجة[٢].

$$\text{ف} = \text{ن}\ \text{ف}_{\text{د}} - \frac{\text{ت}}{١٢\ \text{ر}\text{س}}\left(\text{ن}^{٣} + \frac{٩}{٤}\ \text{ن}^{٢} + \frac{١}{٢}\text{ن}\right) \qquad \text{..........} \quad ١\text{أ}١$$

وتكون فلطية الذبذبات (ripple voltage)

$$\pm\ \text{ف}_{\text{ذ}} = \frac{\text{ت}}{١٦\ \text{ر}\text{س}} .\ \text{ن}\ (\text{ن} + ٢) \qquad \text{..........} \quad ١\text{أ}٢$$

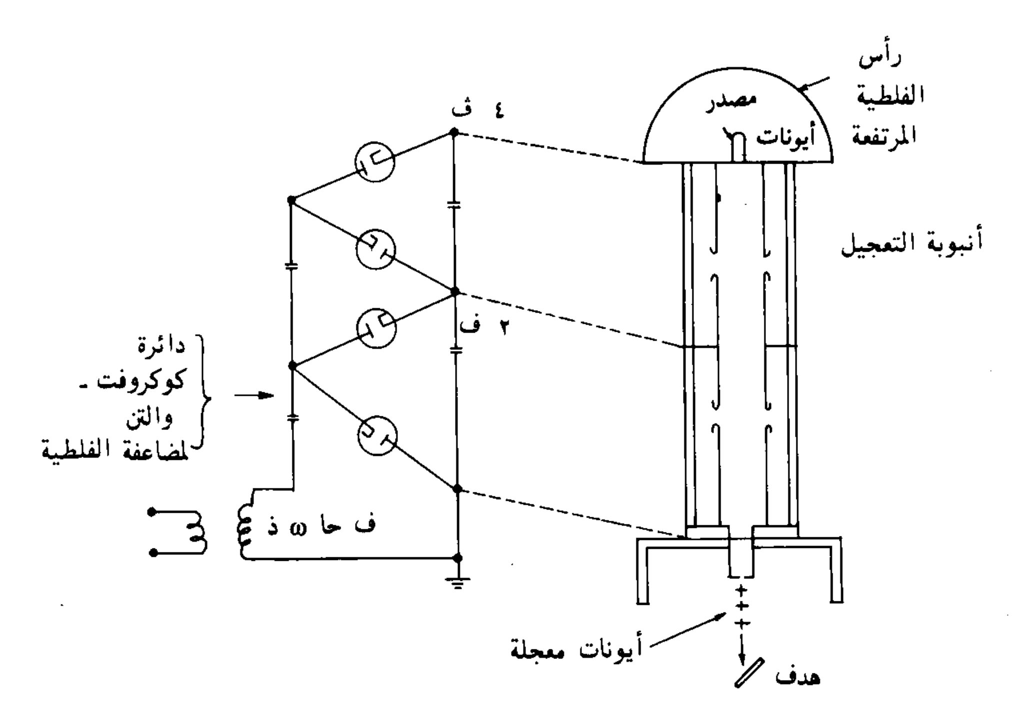
حيث $\text{ف}_{\text{ذ}}$ = ذروة الفلطية الداخلة (مخرج المحول).

س = سعة كل مكثف ، ر = تردد تغذية التيار المتردد الذي يغذي للمحول.

ومن الجلي أن التردد العالي يعتبر ميزة نظراً لأنه يرفع الفلطية الخارجة ، أو يقلل من أحجام المكثفات لنفس الفلطية الخارجة . وعلاوة على ذلك ، تعمل الترددات العالية على تقليل ذبذبات الفلطية بجدة ، ويمكننا الحصول من المعادلة ١ أ ٢ على القيمة الفضلى لعدد ن ، أو عدد مراحل مولد التعاقب.

التطوير التقني لمعجلات كوكروفت ـ والتن

قد يتبادر الى الذهن أنه لا يوجد حد أعلى لزيادة فلطية مولد الكوكروفت ـ والتن ، وإنه كلما أضفنا مراحل أكثر للمكثفات والمقومات ، كلما كانت الفلطية الطرفية الممكن الحصول عليها أكبر ، الا أنه يتضح من المعادلة ١ أ ٢



شكل (١ ـ أ ـ ٢) معجل كوكروفت والتن المتطور (٧ر. م إ ف)
(مرجع ١)

أن هبوط الفلطية يتناسب مع القوة الثالثة لعدد المراحل، وانه لذلك يكون العدد الحدّي (threshold) من المراحل هو الذي تكون زيادة الفلطية الناتجة عن زيادة عدد المراحل متوازناً مع هبوط الفلطية المتوقف على ارتفاع التحميل والذي يحدث على مكثفات الربط والتنعيم (coupling &

smoothing) ، كذلك يمثل تدهور الفلطية العالية «كورونا» من الناحية العملية تحديداً خطيراً. وقد اتبعت التطورات التقنية وسائل عديدة للتغلب على هذه المشكلة، فأولاً، تم ادخال تحسين على الأجزاء، مثل استبدال صمامات تفريغ المقومات بمقومات سيلينيوم للاستغناء عن محولات الفتيل من أجل تقليل التكاليف وحجم الجهاز والتعقيدات، فضلا عن تقليل مشكلات الصيانة. وفي واقع الأمر بنيت في عام ١٩٥٢ أول مولدات للفلطية العالية ذات التيار المستمر بمقومات من الجوامد (solid state)، ومنذ ذلك الحين استبدلت الصمامات الأيونية الحرارية التقليدية أكثر وأكثر بمقومات السيلينيوم والسيليكون. وقد تم بناء عدد كبير من أجهزة تغذية القدرة ذات الفلطية العالية بتيار مستمر مستخدمة السيلينيوم خلال العشرين سنة الماضية وذلك بسبب مقدرتها على تحمل الفلطية العالية وموجات التيار الإندفاعية (surges). ومع ذلك فإن التأثيرين اللذين يحدّان من استخدام مقومات السيلينيوم هما:

أ) إن كثافة تيارها المنخفضة تقتضي استخدام أبعاد كبيرة محددة لأحجامها في حالة مقومات التيار الكبير.

ب) تحديد للتردد الممكن استخدامه الى حوالي ٢٠ كيلوسيكل/ثانية.

وحتى يمكن التغلب على هذه الصعوبات لمواجهة الطلب المتزايد على مغذيات التيار المستمر ذات القدرات العالية، طوّرت ركامات مقومات جديدة[٣] باستبدال السيلينيوم بالسيليكون في تغذية قدرة الفلطية العالية المضادة لقصر الدائرة (short - circuit proof). ولقد تحقق ذلك بوقاية ثنائيات المقومات بشبكة غير فعالة حتى يمكن الحد من التيار الامامي وحتى تكافأ الفلطية العكسية، وكذلك باستخدام مفاعلات معوضة ذات نوعية عالية (high-Q) توضع بين اعمدة التيار المتردد لمولد التعاقب المتماثل، وهكذا تتحسن الوقاية ضد الفلطيات العابرة (transient) وتقلل هبوط الفلطية.

ونقدم فيما يلي أمثلة لمولدات كوكروفت ـ والتن ذات القدرة الكبيرة (تصنيع اميل هيفلي) والتي ترتكز على هذه المبادىء

١ ـ مصدر تغذية للقدرة ذات التيار المستمر ، ٧٧٠ ـ ك ف و١٨٠ مليّ أمبير ، يتكون من ٣ مراحل بمقومات سيليكون ، يزود الطاقة لمعجل للتيار المستمر خلال مقاومات اضمحلالية تبرد بالماء وتحمي أنبوبة التعجيل كما تحميٰ مصدر تغذية القدرة من التخريب عند حدوث الشرارة الفوقية (sparkover) التي تحدث في أنبوبة حزمة الأشعة. والميزة الفائقة للغاية في ذلك المصدر هي مقدرته على تحمل التفريغ الكهربي المتكرر ، وهكذا تتيح استخدام جهاز تلقائي لاعادة بدء التشغيل الذي يعمل على استعادة الفلطية الخارجة خلال عدة ثوان بعد كل قطع بسبب التيار المتصاعد . وقد استخدمت مثل هذه الأجهزة فيما يسمى «المعجل الأمامي» (pre - accelerator) أو كحاقنات (injectors) للمعجلات الأعلى طاقة .

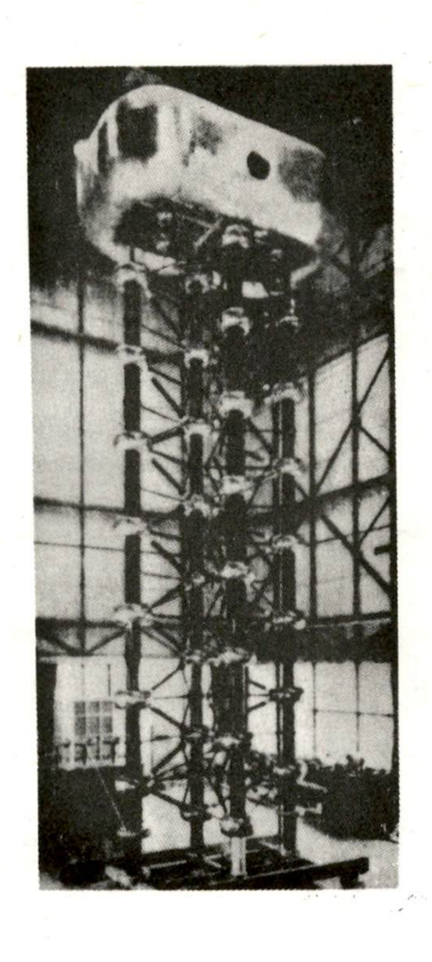
٢ ـ تم تطوير مولد متعاقب ، ٢ ـ ميجافلط ، ذي سبعة مراحل وذلك ليعمل في الضغط الجوي حتى يمكن استخدامه كجهاز اختبار يزود ٣٠ مليّ أمبير في حمل الاختبار (test load) .

وقد أوضح تشغيل هذا المولد الى ما تصل قيمته حتى ٥ر٢ م ف مدى الثقة في مقومات السيليكون ذات التصميم المبتكر والمدى الذي يتسنى للفلطية العالية أن تصل اليه في الضغط الجوي . وفي هذه الحالة سيكون حجم المولد كبيراً بدرجة ملموسة . (أنظر شكل ١ أ ٣) .

ومن ناحية أخرى ، اذا أريد أن يكون حجم المعجل مدمّجاً لسهولة تداوله في التطبيقات العملية ، لزم استخدام غاز عازل ذي ضغط مرتفع . وعلى سبيل المثال ، فإن طلب مصادر التيار المستمر ذات القدرة العالية قد نشأ عن التشعيع الصناعي بواسطة حزم الالكترونات . ويكون عزل الأجهزة المدمجة

الحجم ، (الصورة ، شكل ١ أ ٤) ، التي تزودنا بحزم الكترونية بطاقة قدرها ٦٠٠ ك إف ، وتيار ١٠٠ **ملي** أمبير تقريباً بواسطة غاز سادس فلوريد الكبريت بضغوط ٤٥ رطل/ بوصة مربعة[٣] . وفي هذا النوع توصل على التوالي عدة وحدات مغلفة من مقومات السيليكون من أجل الفلطية العكسية العالية حق يتسنى حماية المقومات ضد شدة المجال العالية الذي يواجه في مثل هذا النظام المدمج . ومن المفيد ملاحظة أنه بهذا المعدل المرتفع للقدرة يتسنى تزويد معجلين للالكترونات أو أكثر بالطاقة في وقت واحد .

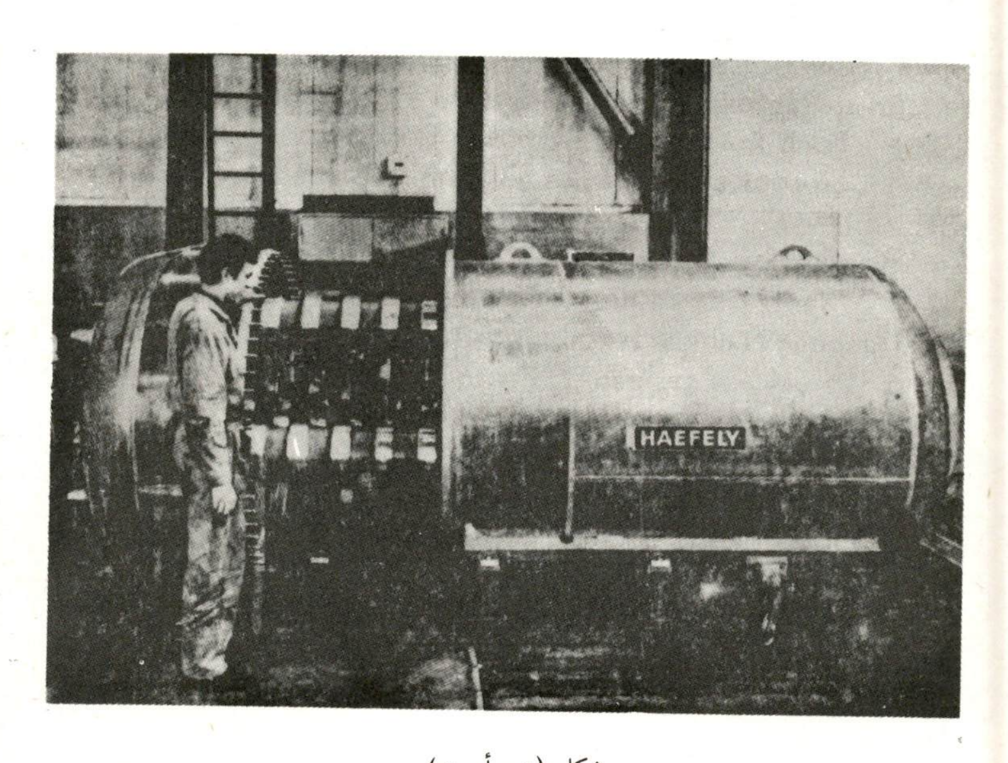
كذلك تستخدم معجلات التيار المستمر ذات الفلطية العالية من نوع كوكروفت ـ والتن في توليد نبضات الحزم لتحقن في معجلات الطاقة العالية ، كما سنرى في الجزء ١-٠ب ، فعندما تنبّض الحزمة يصير من الممكن تعجيل ذروات عالية من التيار دون متطلبات قاسية من معدل تغذية التيار المستمر نظراً لأن القيمة المتوسطة لاتساع نبضة ما ، ولمعدل تكرار النبضة ، يمكن أن يكون صغيراً نسبياً . انها تتوقف دائماً على خواص حزم الأشعة ذات الطاقة العالية وعلى ما نحتاجه فعلا في نهاية الأمر فوق الهدف ، وسوف يمكن هذا من تحديد ما ينبغي أن تكون عليه خواص حزم الاشعة الخارجة من حاقن كوكروفت ـ والتن « المعجل الأمامي » (pre - accelerator) بحيث يعطي تلك الخواص لجسيمات الطاقة العالية النهائية بعد أن تتم رحلتها في اتجاه مجرى حزمة الأشعة طوال الطريق الى الهدف . وفي هذا الشأن يؤخذ في الاعتبار فواقد تيار حزم الأشعة ومشكلات التوافق بين انبعاثية حزم الأشعة وقبولها (emittance - acceptance matching) . وفي المقابل ، نرى أن خواص حزم الأشعة الخارجية من الحاقن « المعجل الأمامي » ستتوقف كذلك على خواص حزم الأشعة عندما تخرج من مصدر الايونات ، وعلى التوافق بين انبعاثية مصدر الايونات وقبول المعجل الأمامي من نوع كوكروفت ـ والتن . وكمثل على هذا النوع نسوق مصدر تغذية قدرة التيار المستمر حاقن كوكروفت



شكل (١ ـ أ ـ ٣)

مقوم تعاقبي متماثل ذو سبعة مراحل
لـ ٥ر٢ م ف ، ٢٠٠ ملي أمبر
(باذن من شركة اميل هيفلي ليمتد)

ـ والتن الخاص بسينكروترون ميل الصفر (١٣ ب إ ف) (Zero Gradient Synchrotron) في مختبر أرجون القومي بأمريكا ، وهو المصدر الذي يستغل



شكل (١ ـ أ ـ ٤)

جهاز تغذية قدرة التيار المستمر ٦٠٠
ك ف ، ١٠٠ ملي أمبير في خزان مزود بالضغط
(باذن من شركة اميل هيفلي ليمتد)

مبدأ مولد التعاقب المتماثل (٤) ، شكل ١ أ ٥ والذي يولد فلطية قدرها ٨٠٠ ك ف . ويتلقى حاقن التيار المستمر حزمة أشعته من مصدر أيونات « الديوبلازماترون » الذي يولد نبضات للتيار ذات ذروة قدرها ٥ر٠ أمبير الى عدسة الكترونية من نوع « آينزل » (Einzel) ، ثم الى أنبوبة تعجيل كوكروفت والتن التي تحقن حزمة أشعتها في معجل خطي طاقته ٢٠٠ م إ ف ، والذي بالتالي يحقن حزمة أشعته في « سينكروترون ميل الصفر » ذي ١٣ ب إ ف .

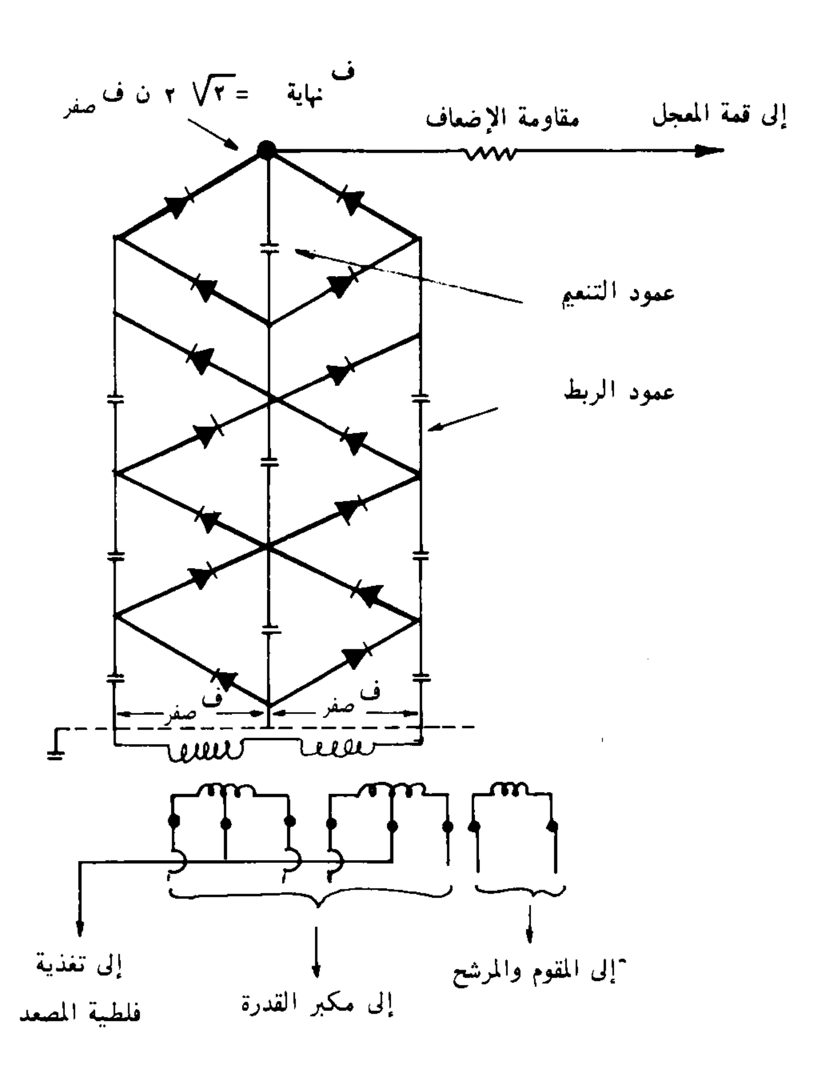
مولدات كوكروفت ـ والتن ذات الفلطية فائقة الارتفاع :

استمرت التطويرات الاضافية لمولدات كوكروفت والتن المتعاقبة من أجل الارتفاع وزيادة تيار الحمل في محاولة لتلبية الطلب المتزايد للفلطية الفائقة الارتفاع ولمولدات كوكروفت والتن ذات القدرة العالية . وقد أملى هذه الطلبات الاهتمام المتزايد بأجهزة الاندماج التي تسخن بحزم أشعة كثيفة من حاقنات الكوكروفت والتن، وكذلك التطبيقات الأخرى (مثل خطوط فلطية التيار المستمر الفائقة الارتفاع). وكانت واحدة من تلك المحاولات بواسطة « راينولد »[٥] الذي أجرى تحليلا نظرياً يهدف الى التصميم الأفضل لمتغيرات مولد الكوكروفت والتن وقدم المعادلات الشهيرة لهبوط الفلطية السعوي (capacitive) المتوقف على الحمل ، فضلا عن التموجات المتوقفة على الحمل . وحصل في حالة عدم التحميل على النسبة بين الفلطية الحقيقة والفلطية المثالية لدائرة التيار المستمر المفتوحة على النحو التالي :

$$\frac{ف_{\text{حقيقية}}}{ف_{\text{مثالية}}} = \frac{١}{٢ن\sqrt{\frac{س_م}{س}}} \cdot \text{ظاع} \frac{٢ن س_م}{س} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad ١ أ ٣$$

حيث س = سعة مكثف الربط أو التنعيم ، $س_م$ = مجموع سعة « شرود » الفلطية العالية وسعة التناثر لنصف المرحلة ، ن = عدد المراحل .

ويرى من المعادلة ١ أ ٣ انه في حالة عدم التحميل يحدث هبوط للفلطية على مولد التعاقب ، لذلك يطلب فلطية أعلى للمحول ليتسنى الحصول على فلطية التيار المستمر المتوقع الحصول عليها طبقاً للمعادلة ١ أ ١ بوضع ت = صفر . ومن ناحية أخرى نرى النسبة بين التموجات السعوية وفلطية التيار المستمر الحقيقية المفتوحة تتزايد بزيادة ن لقيمة معينة للنسبة $\frac{س_م}{س}$ ، كما تزيد بزيادة $\frac{س_م}{س}$ لقيمة معينة للعدد ن . أما في حالة تحميل المولد فإننا نجد أن



(شكل ١ أ ٥) شكل كتلي لمولد ٨٠٠ ـ ك ف التعاقبي المتماثل (مرجع رقم ٤).

هبوط الفلطية المتوقفة على الحمل في مولد التعاقب المتماثل مساوٍ الى :

$$\frac{١}{رس}\;\frac{ن}{٣}\;\left(\frac{ن^{٢}}{٢}+١\right)$$

لقد اتخذ هذا التحليل أساساً لتطوير مولدات كوكروفت والتن التعاقبية ذات التيار الكبير. ويلاحظ ان رفع تيار الحمل إنما يتطلب زيادة التردد ، الا انه يوجد حد عملي لزيادة التردد نظراً لعدم توفر محولات التردد والمحولات ذات التردد العالي عند القدرات الكبيرة الخارجة ، إذ يبدو أن التردد الأقصى هو ٢ كيلوهيرتز . كذلك توضع قيود على س ، $س_م$ لأن الطاقة المختزنة لا ينبغي أن تكون كبيرة الى الدرجة التي تسبب تدمير الحمل في حالة انهيار الفلطية أو قفز الوميض (flashover) . ومن ناحية أخرى فان « ن » لا ينبغي أن تكون كبيرة جداً للسبب المذكور سابقاً ، كما انها لا يمكن أن تكون صغيرة أكثر من اللازم والا صارت فلطية « ما قبل المرحلة » متزايدة . ويبدو أن أقصى طاقة أمكن الحصول عليها حتى تاريخه من معجل كوكروفت والتن المتعاقب هي معجل الـ ٢ر٥ م إ ف الذي ذكر سابقاً . وعند هذه النقطة فان حد الزيادة للفلطية يعود الى عوامل هندسية كما سبق أن ذكرنا ، والى عوامل اقتصادية كما سنرى في الباب الرابع .

١ ـ أ ـ ٢ مولد فان دي جراف الالكتروستاتي

مقدمة :

وفي نفس المرحلة الزمنية التي أنشىء فيها معجل كوكروفت والتن ، قام روبرت فان دي جراف في جامعة برينستون بتطوير معجل بسيط ولكنه فعال وذلك في محاولة لإنماء مجال الفيزياء النووية . فقد حقق فان دي جراف مبدأ المولد « ذي السير المشحون » لاول مرة حوالي عام ١٩٣٠ وذلك ببناء جهاز من

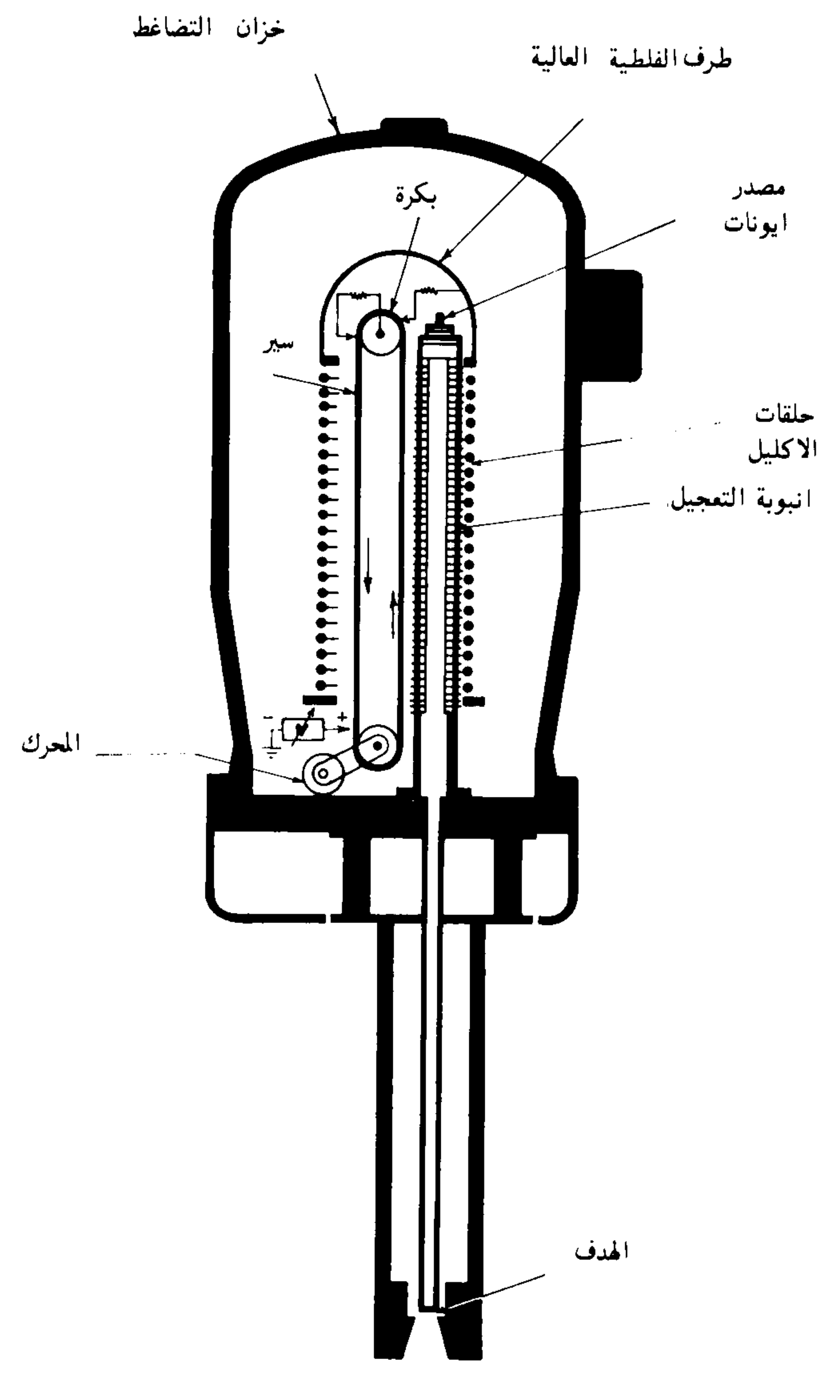
أجزاء قليلة التكاليف تتكون من قطبين كرويين من الالومنيوم مقامة على قضبان زجاجية ومع كل منها سير حريري يدار بموتور لينقل الشحنة(٥)، بحيث أعطيت احدى الكرتين شحنة موجبة والأخرى سالبة. وهكذا كوّن فرق جهد بقيمة ١ر٥ م ف تقريباً بين الأطراف ومحدد فقط بالتفريغ الاكليلي (corona) من الأطراف. وقد كان لبساطة هذه الماكينة بالاضافة الى الفلطية الثابتة المستمرة ما جعلها جذابة كمصدر فلطية لتعجيل الايونات الموجبة. كذلك كان من الواضح أن هذه الطريقة يمكن الاستفادة بها للحصول على الفلطيات العالية. ولقد أجريت بالفعل تطويرات وتعديلات اضافية، وفي عام ١٩٤٠ استكملت ماكينة كمعجل للالكترونات وللايونات الموجبة الى طاقة ٢ر٧٥ م إف استخدمت في البحوث لعدة سنوات. وبذلت جهود اضافية لتصميم معجلات يمكن أن يعوّل عليها أكثر وذلك بتوضيح مشكلات تكوين التفريغ الاكليلي والشرارات المدمرة على طول الأعمدة العازلة التي يقام عليها الغلاف الكروي للفلطية العالية. وأجريت دراسات لمشكلات أخرى أساسية مثل قياس الجهود بفجوات الشرارات والفولتميترات المولدة، وذلك بهدف انشاء مصدر مستقر يعول عليه للتجارب النووية. ولعل أول المعجلات الالكتروستاتية العملية التي استخدمت في البحث النووي الذي نتج عنه سلسلة هامة من البحوث عن «دالات الاثارة» التي أظهرت رنينات نووية حادة كانت هذين المعجلين اللذين بنيا في معهد كارنيجي بواشنطن. فأولها كان مولداً ٦٠٠ ـ ك ف بقطر متر واحد ويعجل الايونات، وكان الثاني مولداً متراكز الغلاف مقاماً على تنظيم لحامل يتكون من ثلاثة قوائم من «التيرتورايت». ويعبر الحجرة أفقياً حزاما شحن كما تمر أنبوبة رأسية خلال الأرضية حتى يمكن تحليل حزمة الأيونات مغناطيسياً وتجري التجارب في الجزء الأسفل من المبنى، وقد أمكن تعجيل الأيونات الموجبة في هذا المعجل الى طاقة ١ر٣ م إف(٧). وفي نفس الوقت حدثت تطويرات على استخدام الضغط المرتفع للغاز لعزل الطرف ولزيادة الجهد في مختبرات أخرى حيث أوضحت الفحوص أن

جهد الانهيار يزيد بالتقريب خطياً مع ضغط الغاز[٨]. ولقد كانت هذه نقطة تحول في تطوير المولدات الالكتروستاتية حيث كانت المزايا البارزة لذلك الحجم الأصغر للماكينات والتحكم الأفضل للرطوبة في خزان الضغط. واستمرت مثل هذه التطويرات الى أن وصل مولد فان دي جراف الالكتروستاتي الى شكله الحديث ليومنا هذا. وقد تحقق ذلك نتيجة للمجهودات والتطويرات التكنولوجية في مختلف المختبرات كما حدث في جامعة ويسكونسن - مجموعة هيرب - وفي مختبر الفلطية*العالية في معهد ماساشوسيتس للتكنولوجيا وفي الشركة الهندسية للفلطية العالية، كمجرد أمثلة.

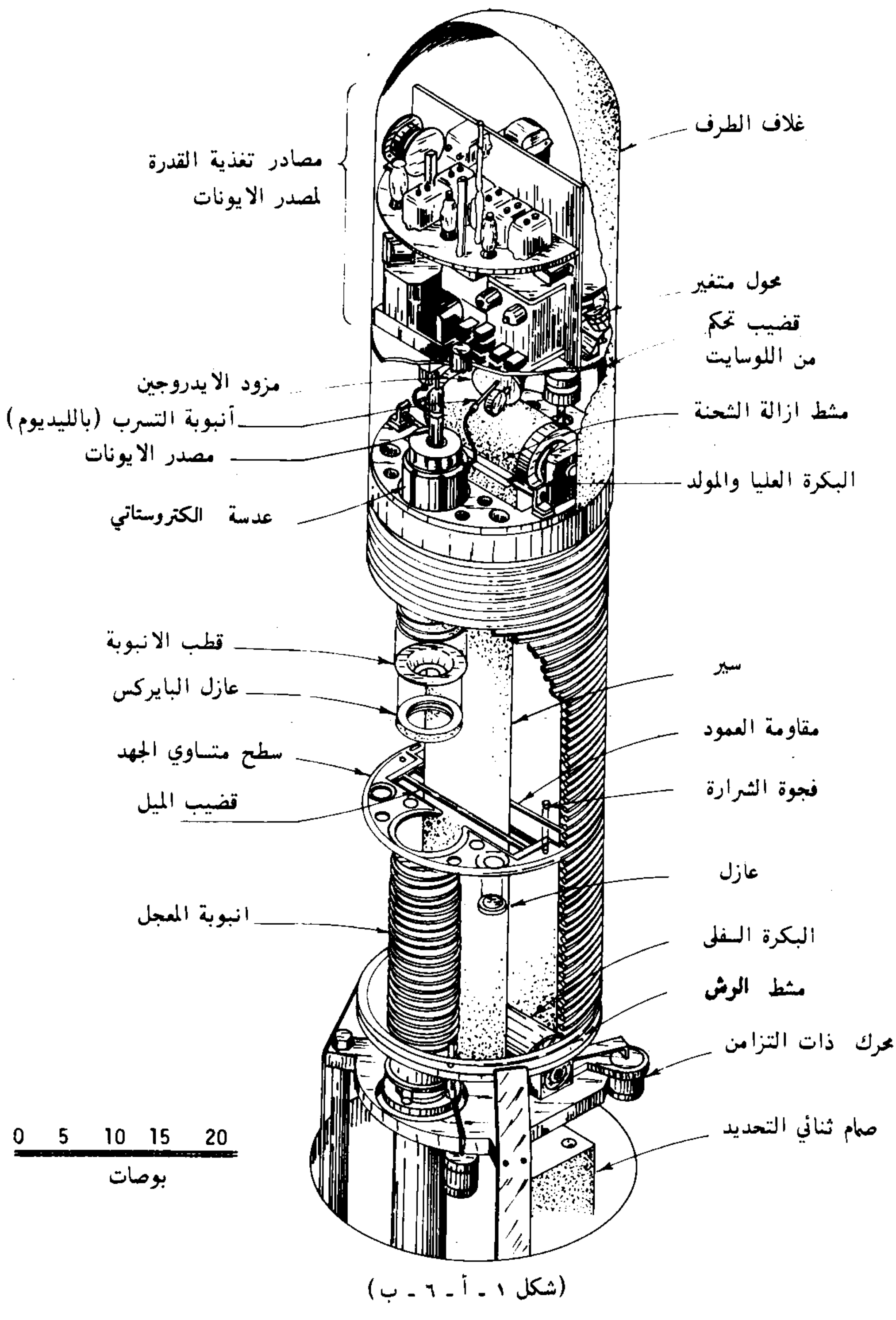
مبدأ تشغيل معجل الفان دي جراف:

يتكون معجل الفان دي جراف العادي بصفة أساسية من الأجزاء الآتية (شكل ١ أ ٦):

قطب نصف كروي يعمل كطرف الفلطية العالية، عمود عازل يرتكز عليه الطرف، سير يُدارّ بين بكرتين، واحدة منها ذات جهد أرضي تدار بمحرك والثانية داخل الطرف، لوح للفلطية العالية يحمل مصدر الأيونات ومصادر تغذية القدرة في داخل الطرف، أنبوبة تعجيل تحت مصدر الأيونات، حلقات الاكليل، مجموعة ابر الشحن عند البكرة السفلى ومتصلة الى تغذية للفلطية العالية ومجموعة أخرى من إبر تفريغ الشحنة متواجدة في الطرف. ويُغطى المجمع كله بخزان التضاغط المحكم. كما ينبغي أن يعمل نظام للتفريغ على ضمان ما يماثل 10^{-6} مم زئبق في أنبوبة التعجيل. هذا «وتُرَش» الشحنة على سير متحرك عند الطرف الأرضي ويتحرك السير بين الكرتين ليحمل الشحنة الى الطرف. كما يزوِّد جهد مرتفع من ٢٠ - ٣٠ ك ف تقريباً مجموعة «الابر» (نقط الاكليل) التي تواجه عرض الحزام كله من أجل الاحتفاظ بتفريغ اكليلي بين الابر وأقرب أرضي ليتسنى تأيين الهواء. ويتم ترسيب شحنة



شكل (١ ـ أ ـ ٦ ـ أ) رسم تخطيطي لمعجل فان دي جراف **الكتروستاتي**



(شكل ١ ـ أ ـ ٦ ـ ب)

مقطع في معجل فان دي جراف
(باذن من معمل اوك ريدج القومي)

موجبة على السير حتى تشحن الطرف بشحنة موجبة وهكذا يمكن تعجيل الأيونات الموجبة ، وفي هذه الحالة يجب أن يكون جهد الابر موجباً - والا فيستخدم جهد ابر سالب ليشحن السير والطرف بشحنة سالبة . وتستعمل مجموعة ابر مماثلة داخل الطرف ومتصلة به كهربياً لازالة الشحنة من السير الصاعد . ولكي يمكن الاحتفاظ بالتفريغ الاكليلي اللازم ترتفع البكرة المعزولة في الطرف الى جهد فوق جهد الطرف بما فيه الكفاية . وبخلاف هذا الجهد يكون الحيز داخل الطرف خالي المجال في الوقت الذي تظهر فيه الشحنة على السطح الخارجي للطرف . ويلاحظ أن عملية الشحن التي تحدث في القاعدة الأرضية وتفريغ السير في الطرف «المتساوي - الجهد » يكونان تحت تحكم منفصل ومستقلين عن الفلطية الطرفية .

وفي بعض الأحيان « تُرش » شحنة بالاشارة العكسية على السير حالة نزوله داخل الطرف وتُلتقط هذه الشحنة عند الطرف الأرضي ، وهكذا يضاعف التيار الشاحن بسبب تساوي الشحنات الصاعدة والنازلة .

والآن ، يُعطَى التيار الثابت الناتج عن شحنة « ش » بالقيمة :

ت = $\frac{دش}{دز}$ ، ويرفع الطرف الى جهد كهرإستاتي جـ = $\frac{ش}{س}$ ، حيث س هي سعة الطرف الى الأرض . وهكذا يمكن تعيين معدل نمو الفلطية $\frac{دجـ}{دز}$ = $\frac{ت}{س}$ إذا عرفت كل من س ، ت . أما عن قيمة السعة فهي توجد بسهولة بالنسبة لغلاف كروي معزول للطرف ، أو لطرف متحد المركز مع غلاف أرضي ، وتقدر قيمة س بقليل من مئات البيكروفراد . ومن ناحية أخرى يتكون التيار الشاحن من الأجزاء التالية التي تعود للأرض من رأس الفلطية المرتفعة (الطرف) في طرق مختلفة (شكل ١ أ ٧) :

أ - التيار المفيد لحزمة الأيونات الموجبة التي تعين بواسطة أحوال مصدر الأيونات وليس بفلطية الطرف .

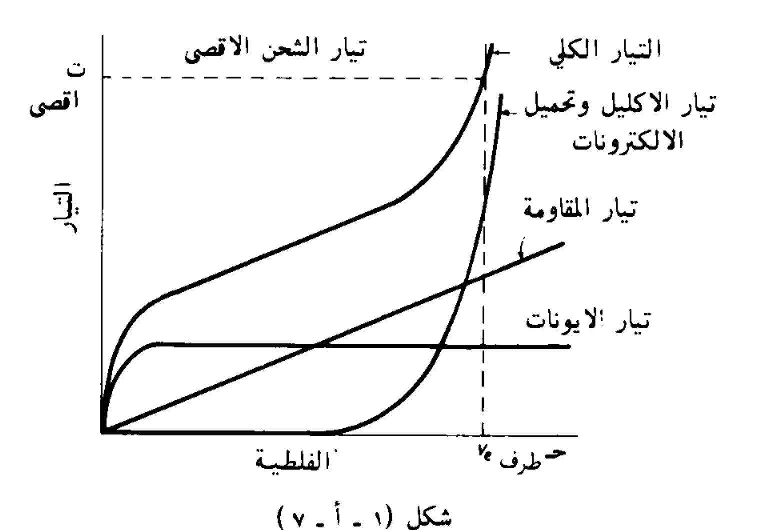
ب - التيار الذي يمر في مقاومات مقسم الجهد والذي يزيد نسبياً مع فلطية الطرف.

جـ - تيار الالكترونات الثانوية التي تحرر بواسطة الأيونات الشاردة عندما تصدم حوائط الأنبوبة. ويذكر أن التيار العكسي للالكترونات الثانوية يعجل لأعلى العمود ويصدم مصدر الأيونات لتنتج أشعة سينية. ويزيد هذا النوع من التحميل بسرعة بزيادة الفلطية فوق حد واضح، كما يرى في شكل ١ أ ٧، كما أن تيار الاكليل يضاف الى هذا الجزء ويسلك مثلما يفعل التيار الثانوي.

ويلاحظ ان تغيير هذه الأجزاء من التيار مع الفلطية الطرفية والتي نراها في شكل ١ أ ٧ تعطى قيمة جهد التوازن جـ توازن[٩] الذي سيرتفع اليه الطرف مثلما يتحدد بواسطة تيار الشحن الأقصى المتاح لدينا.

ويجدر بالذكر أن فلطية الطرف يمكن التحكم فيها بتنظيم تيار الشحن أو بتغيير كمية تيار التحميل الاكليلي بواسطة نقاط الابر المتغيرة الوضع تجاه نقطة واحدة على مسطح الطرف. وكما نرى من الرسم فان التغيير الفائق السرعة لتيار الاكليل مع الفلطية يميل الى تثبيت الفلطية عند قيمة التوازن، وهذا يجعل معجل الفان دي جراف متسماً بأن طاقة حزمة الأشعة الصادرة عنه تكون متجانسة بشكل غير عادي، فعندما يجهز بمحلل لحزمة الأشعة يكون مدى طاقة الحزمة ودرجة الاستقرار التي يمكن بها الاحتفاظ بهذه الطاقة في حدود ١ الى ٢ ك ف.

وكما ذكرنا من قبل، فان استخدام الغاز العازل ذي الضغط المرتفع يزيد من قيمة فلطية الانهيار، ويرى في شكل ١ أ ٨ ملخص لخواص الغازات المضغوطة (المرجع ٩، ص ٤٨)، حيث يتضح أن سداسي فلوريد الكبريت هو أفضل الغازات المختبرة، فهو يعطي حوالي ضعف الجهد الأقصى الممكن الحصول عليه في الهواء عند نفس الضغط. وقد أدى استخدام كب فل$_٦$ الى



شكل (١ ـ أ ـ ٧)

الدالات النموذجية للتيار مقابل الفلطية للاجزاء المتعددة للتيار الكلي الشاحن في مولد الكتروستاتي.
تحدد فلطية الطرف طرف بالتيار الشاحن المتغير ت اقصى.

تصميم معجلات أكثر اندماجاً ومع ذلك فإن معظم المختبرات تفضل استخدام مزيج من النيتروجين وثاني أكسيد الكربون بسبب تأثير التآكل (corrosive) لنواتج الانفصال مع الغازات السالبة الشحنة (الحامضية).

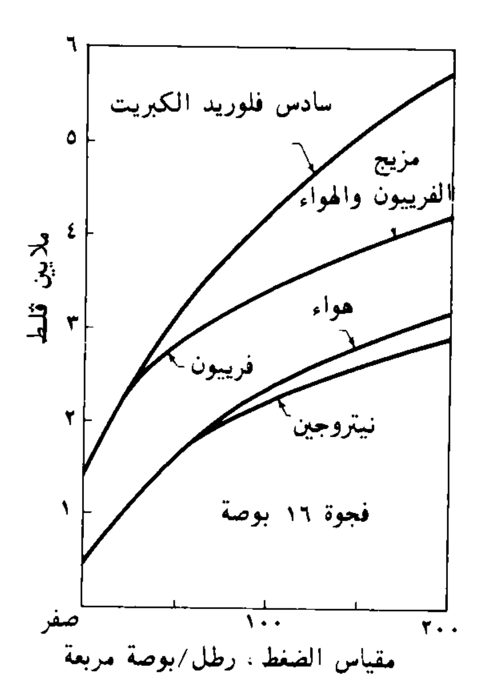
ارتكاز المعجل :

يمكن استخدام أعمدة عازلة من مادة ألياف اللاميناييت أو التيكستولايت ليرتكز عليها المعجل أفقياً أو رأسياً ، وفي حالة أعمدة التيكستولايت تتوقف فلطية قفز الوميض على تصميم توصيلة الطرف أكثر من أي عامل آخر حيث يؤثر ذلك على بدء تفريغ الاكليل عند سطح التيكستولايت ، ويجب أن تتخذ احتياطات لمنع هذا التأثير باستخدام حلقات الاكليل الواقية المتباعدة . ولقد قدمت عدة تصميمات مثل استخدام صفوف من الزجاج القصير (shortglass) أو عوازل السيراميك الواقعة بين ألواح معدنية مستوية متساوية ـ الجهد . كذلك ساهم استخدام اللاصقات الحديثة في حل مشاكل قفز الوميض .

أنبوبة التعجيل :

لعل أكثر أجزاء المعجل حرجاً هو أنبوبة التعجيل حيث أنها تعتبر العامل المحدد لزيادة الجهد . وهي تتكون من أقسام اسطوانية معزولة مزودة بمانعات التسرب المحكمة التفريغ مع أقطاب معدنية مسطحة بين الأقسام . ويمكن أن تكون مادة الأقسام العازلة بورسيلين أو زجاج ، ولو أن الزجاج الصلب أثبت مقدرته على تحمل ميول الجهد ، وعلى سبيل المثال مادة « كورننج فيكور » (٩٦٪ زجاج سيليكا) والكورننج ٧٠٧٠ (زجاج بوروسيليكات ذو المقاومة المرتفعة) . على أن قفز الوميض يكون مسبباً للمتاعب في الجانب المواجه للتفريغ من العوازل (داخل أنبوبة التعجيل) أكثر منه على الجدران الخارجية المعرضة للغاز المرتفع الضغط . ومن الممكن أن يكون ذلك بسبب تأثير الشحنات السطحية .

توصل الأقطاب الى حلقات متساوية الجهد وذلك للاحتفاظ بتوزيع متناسق للجهد على طول الأنبوبة ، وتُصف الفتحات ذات القطر الكبير (أو الأقطاب الأنبوبية) على طول محور الأنبوبة ، وهي تنتج مجالا معجلا ومركزاً للجسيمات



شكل (١ ـ أ ـ ٨)
فلطية الانهيار الشراري مقابل ضغط الغاز لبضعة
غازات في مولد «ام آي تي» التجريبي (مرجع ٩ ، ص٤٧)

المشحونة ، ويكون شكل الأقطاب بحيث أنها تحمي جدران الأنبوبة من حزمة الأشعة لتقليل امكانية قفز الوميض ولتحجب حزمة الأشعة من تأثيرات الشحنات السطحية الاستاتية على العازل . ويجدر بالذكر أنه ينبغي إعطاء عناية فائقة لمانعات التسرب الى التفريغ عند الوصلات وعلى الأخص عندما يستخدم للعوازل غاز خارجي ذو ضغط مرتفع . وتبنى بعض أنابيب تعجيل

الالكترونات من عدد كبير من أقراص الكوفار وحلقات قصيرة من البايركس مزودة بمهبط حراري أيوني عند احدى نهاياتها. كما أن أنابيب أخرى (وعلى الأخص بالنسبة للأشعة السينية) تستخدم الزجاج القصير أو حلقات البورسيلين مع أقطاب الألومنيوم. ومن ناحية أخرى فان أنابيب تعجيل الأيونات الموجبة تحتاج سرعات أعلى للتفريغ، لذلك فان قطرها يكون أكبر. وفي الحالات التي تستخدم فيها أنابيب ذات قطر صغير يلزم تزويد أنبوبة ثانية عازلة موازية للأنبوبة الأصلية للضخ التفاضلي.

الحد من زيادة الطاقة:

قبل أن نتناول العوامل التي تحد من زيادة الطاقة في معجل الفان دي جراف يجب أن نعالج مشكلة قياس الفلطية أولا، اذ أن هذا على جانب من الأهمية كذلك بالنسبة لفحوص طاقات التفاعل ومستويات الطاقة النووية. وتعتبر دقة قياس طاقة الجسيمات بالوسائل الفنية الحالية في حدود قليل من ك إف لمولد الكتروستاتي ٥ م إف. كما يعتبر «الفولتميتر المولّد» واحداً من أشهر الطرق المستخدمة للماكينات الفردية الطرف[١١]. ويتوقف مبدؤها على الشحنة الاستاتية المستحثة على لوح معدني معزول أو «ريشة» مروحية (vane) بالقرب من حاوي الضغط الخارجي المحيط بالطرف. وتعين قيمة الشحنة المستحثة بواسطة المجال الكهربي الناشىء عن الطرف المشحون عند موقع الريشة. ثم يتم تكبير وتقويم الفلطية الاستاتية المترددة المستحثة على الريشة الدوّارة لتؤخذ قيمتها كمقياس للجهد الطرفي. والطريقة الأخرى لقياس فلطية الطرف تكون بقياس التيار المار في صف مقاومات ذي مقاومة عالية متصل بين الطرف والأرض. وهذا يمكن أن يخدم كذلك كمقسم للجهد اذا تم تحجيبه بعناية لمنع فواقد الاكليل وذلك حتى يمكن تزويد جهد موزع بتناسق خلال أنبوبة التعجيل. ومن ناحية أخرى يستخدم الانحراف

المغناطيسي أو الكهربي لحزمة الجسيمات المشحونة في معظم المعجلات الحديثة لمعايرة الفلطية.

وبجانب تفريغات الاكليل فان واحدة من أعظم المشاكل خطورة في الحد من جهد الطرف هي تحميل الالكترونات الذي يسببه الانبعاث الثانوي للالكترونات المحررة من الأقطاب أو من جدران أنبوبة التعجيل. وتعجل هذه الالكترونات الثانوية في الاتجاه المضاد بما يزيد تيار الأنبوبة، وهكذا تحد من جهد الطرف عند معدل شحن ثابت، وتكون شدة الأشعة السينية الناتجة عالية الى درجة أنها تكافىء أشعة جاما الخارجة من عدة كيلوجرامات من الراديوم.

وبناء على ذلك نتج عن التحديد الناتج من تحميل التيار طاقات للأيونات الموجبة تحت الحد العملي المعمول به في المولد بدون أنبوبة التعجيل. وتقدر قيمة نقص الفلطية بمعامل يصل الى ٢ر٠ الى ٤ر٠. على أن تأثير التحميل يمكن تقليله باستخدام سرعات ضخ أعلى، وحواجز أفضل لمنع تدفق الغاز أو مصايد مبردة. وقد أعطيت دراسات مسحية متقنة عن مشكلة التحميل الالكتروني في المرجع ٩ (ص ٥٧).

وهناك تحديد آخر للطاقة يعود الى كثافة شحنة السير التي يحد من قيمتها الانهيار الغازي. وهنا يكون نفس المجال المحدد منطبقاً كما في جهد الطرف، ففي الهواء يكون المجال الأقصى عند الضغط الجوي حوالي ٣ × ١٠^٤ ف/سم، أما الكثافة القصوى للشحنة المتطابقة لهذا فتكون بالنسبة الى مجال متماثل وعمودي على السير: δ قصوى = ٢ ε_0 مـج أقصى = ٣ر٥ × ١٠^-٥ كولوم/م^٢ (حيث δ = الكثافة، ε_0 = المنفذية الكهربية للفضاء الحر = ٨٫٨٥ × ١٠^-١٢ فاراداي/م permitivity of free space، مج أقصى = المجال الكهربائي الأقصى).

هذه هي القيمة النظرية، على أن القيمة العملية لن تزيد عن نصف هذه القيمة القصوى لكثافة الشحنة. فاذا ما حدث تجاوز لهذه القيمة بزيادة معدل

الشّحن يمكن أن تحدث شرارة تؤدي الى تدمير الحزام. إن هذا التحديد للطاقة يمكن معالجته بزيادة الضغط بنفس الطريقة التي يرفع بها جهد الطرف. وعلى سبيل المثال فعند ضغط قدره ١٠ جوي يمكن أن تكون كثافة شحنة السير ٢ × ١٠$^{-٤}$ كولوم/ م^{٢}، وبذلك تزيد بمعامل قدره حوالي ٤. كذلك ساهمت التحسينات التي ادخلت على مادة السير ومعالجتها في تقليل مثل هذه الصعوبات.

ويُلاحظ أن الطاقة القصوى التي يمكن تحقيقها في مولد الكتروستاتيكي قصير مسألة هندسية وتطويرات تقنية قادرة على التغلب على الصعوبات المذكورة فيما تقدم والتي تحد من كثافة شحنة السير وجهد الطرف. وتقع الجهود القصوى الممكن الحصول عليها عادة في المدى من ٤ الى ٦ م ف. على أن الطاقات القصوى المعروفة التي تحققت في معجلات الأيونات الموجبة «الفردية - المرحلة» تكون واحدة منها في «إم آي تي» والثانية في معمل «لوس آلاموس». وكلاهما مقدر أصلاً بـ ١٢ م إف. كما أن كلا المعجلين مقام رأسياً ويستخدمان خزانات تضاغط من أجل العزل. فمعجل «إم آي تي» يستخدم مزيجاً من النيتروجين (٨٠٪) وثاني أكسيد الكربون (٢٠٪) عند ضغط قدره ٤٠٠ رطل/ بوصة^{٢}، وطول العمود العازل ١٨ قدم، وعرض السير الحامل للشحنة ١٨ بوصة ويدار بمحركين قوة كل منهما ٥ حصان. وبجانب أنبوبة تعجيل الأيونات الموجبة يوجد أنبوبة أخرى للضخ التفاضلي، كما أن مغناطيس التحليل يسمح لحزمة الأشعة الأيونية بالتأرجح الى محطات تجريبية متناوبة داخل حجرة المختبر الكبيرة المدرعة. وقد كانت الفلطية القصوى العاملة ٩ م ف.

معجلات الالكترونات الالكتروستاتية:

تستخدم معجلات الالكترونات من نوع الفان دي جراف على نطاق واسع في تطبيقات عديدة كمصادر للأشعة السينية وعلى الأخص عند طاقات مداها

١ الى ٢ م إف ، أما الفروق الأساسية بين معجلات الالكترونات ومعجلات الأيونات الموجبة فهي :

أ - يكون لمعجل الالكترونات طرف سالب الشحنة بدلا من الطرف الموجب.

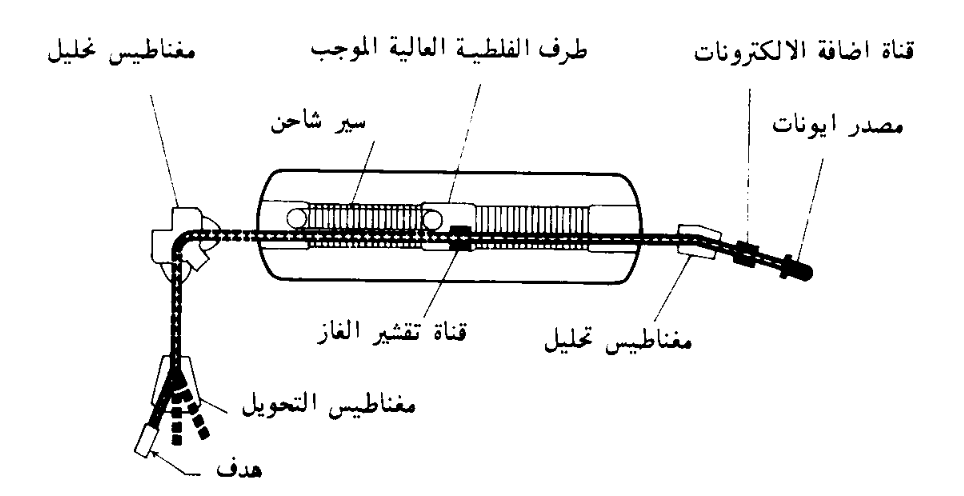
ب - تحل بندقية الالكترونات (electron gun) محل مصدر الأيونات في معجل الأيونات.

جـ - بما أنه لا يستخدم غاز في معجل الالكترونات كما في معجل الأيونات لذلك تكون متطلبات الضخ للتفريغ أيسر ، وعليه تستخدم أنبوبة تعجيل أقل قطراً بما يجعل معجل الالكترونات أكثر إندماجاً لنفس الفلطية المقدرة.

د - لا يكون ثبات الفلطية هكذا حرجاً حيث تكون الأشعة السينية موزعة في شكل طيف مستمر للطاقة بقيمة قصوى تساوي طاقة الالكترونات. وكما سنرى في الباب الثاني ، تستخدم معجلات الالكترونات غالباً في التطبيقات الطبية والصناعية.

معجلات الفان دي جراف الترادفية (Tandem) :

بسبب درجة الثبات العالية لطاقة حزمة الأشعة في مولد الفان دي جراف وكذلك لسهولة مبدأ تشغيله ، ادى الاهتمام المتواصل لتطويره الى نشوء الفان دي جراف الترادفي حيث يمكن استغلال جهد الطرف بضع مرات في تعاقب للحصول على طاقات خارجة أكبر مرتين أو مرات أكثر من المتحصل عليها في معجل ذي مرحلة واحدة ، ويتحقق هذا بأن يعكس شحنة الأيونات المعجلة في المعجلات المتوالية. الا أن عمليات تبادل الشحنة تؤدي الى تقليل شدة حزمة الأيونات. وبالرغم من ذلك فقد أثبتت المعجلات الترادفية أنها انجاز هائل نظراً لأن مجموعة كبيرة من تجارب الفيزياء النووية لا



شكل (١ ـ أ ـ ٩)
معجل ترادفي ثنائي المراحل

تحتاج الا الى قليل من الميكرو أمبيرات التي تكون كافية في حين تطلب طاقات أعلى.

في النوع ذي المرحلتين الموضوع بشكل ١ أ ٩ يوجد مصدر أيونات للتردد العالي خارج المعجل ينتج حزمة من أشعة البروتونات عالية الكثافة التي تعبر قناة اضافة الالكترونات المحتوية على غاز الايدروجين عند ضغط كاف بحيث ينبثق حوالي ١٪ من البروتونات على شكل أيونات لذرات الايدروجين سالبة الشحنة. وتعجل هذه الأيونات السالبة الى الطرف الموجب الشحنة الذي يقام

على دعائم عازلة في وسط أنبوبة التعجيل. وفي الطرف الموجب تعبر الأيونات السالبة قناة «تقشير» (stripping) الأيونات التي تحتوي على غاز الايدروجين حيث تحول الأيونات السالبة الى بروتونات تعجل في أنبوبة التعجيل الثانية الى جهد الأرض. وتكون طاقة الجسم الناتجة (أ + ن) ف، حيث ن = عدد الشحنات الموجبة على الأيون بعد ان يكون قد مر داخل أنبوبة «التقشير»، ف = جهد الطرف. ويجدر بالذكر أن استخدام نوع متقدم وكفي من مصادر الأيونات ذي خواص جيدة، كأن يكون تياره كبيراً وانبعاثيته منخفضة (low emittance)، انما يبسط بشدة قدرة المعجل الترادفي على تعجيل الأيونات الثقيلة، وغالباً ما يستخدم مصدر أيونات الديوبلازماترون. على أنه يتم تحريف حزمة الأيونات في معظم الحالات الى ٩٠° بعد التعجيل باستخدام نظام مغناطيسي دقيق يحلل الجسيمات طبقاً لكمية الحركة (momentum) كما يعطي اشارة استقرار جهد الطرف الموجب. وتعرف احدى الخواص الأساسية لمثل هذا المغناطيس بحاصل ضرب الكتلة ـ الطاقة «وتعريفها $\frac{ك طا}{د^{٢}}$، حيث ك = كتلة الجسم بوحدات الكتلة الذرية، «طا» الطاقة بالمليون الكترون فلط، «د» عدد الشحنات الأولية التي يحملها الجسم. وتصنّع هيئة «هاي فولتيج كوربوراشن» بأمريكا معجلات تقدر طاقتها القصوى بـ ١٢ م إف ويمكن تغييرها من ٢ الى ١٢ م إف، وتيار حزمة البروتونات بها يقدر بـ ٤ ميكرو أمبير ويصل الى ١٠ ميكرو أمبير عند قطر للحزمة ٣ ملّي مترات. وأجزاؤها الرئيسية هي:

١ ـ نظام مصدر الأيونات السالبة حيث تنتج الأيونات السالبة من مصدر للأيونات الموجبة الكثيفة عند جهد الأرض، ثم تركز حزمة الأيونات وتعجل الى غرفة «تبادل الشحنة» حيث تقتني الأيونات إلكترونين. وبعد التركيز الاضافي وتحليل الطاقة والتعجيل المسبق تحقن حزمة الأيونات السالبة داخل منطقة الفان دي جراف حيث تعجل بعد ذلك

الى الطرف ذي الفلطية العالية. على أن مصادر تغذية القدرة وأجهزة التحكم في المصدر تكون متاحة عند جهد الأرض خارج المنطقة المضغوطة. هذا ويزود مصدر الأيونات ومناطق تبادل الشحنة بالضخ التفاضلي.

٢ - نظام تعجيل الفان دي جراف: تولد الفلطية العالية لتعجيل الأيونات السالبة بواسطة فان دي جراف يرفع طرف فلطيته العليا بين عمودين عازلين طول كل منهما ١٢ قدم وهو مقام أفقياً تحت ضغط. كما أن كلا العمودين مزودان بمسطحات متساوية الجهد ومعزولة كهربياً بمقاومات مقسّمة للجهد. ويرتكز العمودان على الشفتين (flanges) الطرفيتين لأوعية ضغط الفان دي جراف. ويحتوي طرف الفلطية العالية على غرفة تبادل الشحنة والملحقات الأخرى التي يتم التحكم فيها عن بعد.

٣ - نظام التفريغ، وامتداد أنبوبة الطاقة العالية: توصل أنظمة ضخ انتشارية من الزئبق وعالية السرعة الى أنابيب التعجيل الممتدة وذلك عند نهايات حقن الأيونات والطاقة العالية للمعجل التوافقي، كما تزود مصايد للنيتروجين السائل. وعند نهاية الطاقة العالية توصل أنبوبة تعجيل الأيونات الموجبة التي تضم الصمامات البوابية، ومجمعات توجيه حزمة الأيونات، وعدسات الميل المتردد لتركيز حزمة الأيونات ونظام مشاهدة الحزمة الأيونية. وبالاضافة الى هذه الأجزاء توجد دعائم التعجيل الحاملة ونظام تجفيف الغاز

ولقد تم بناء فان دي جاف ترادفي ليعطي طاقة قدرها ١٦ م إف.

١ - أ - ٣ التطويرات التقنية الحديثة في المعجلات الالكتروستاتية

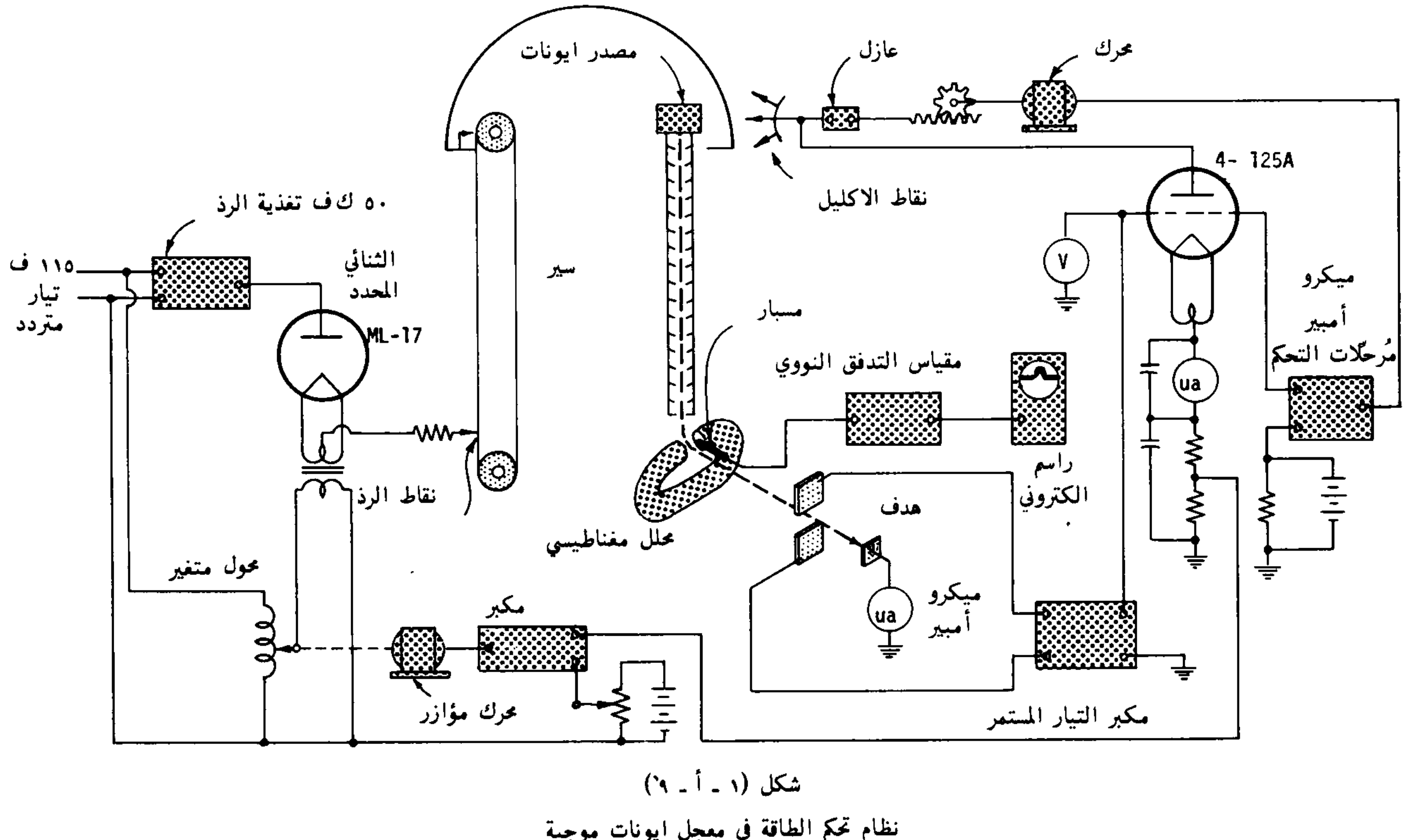
اذا تتبعنا تاريخ المعجلات الالكتروستاتية فسنرى، كما ذكرنا من قبل،

أن أول معجل الكتروستاتي معزول بضغط الغاز المرتفع (في عام ١٩٣٢)[٨] قد ساهم كثيراً في زيادة قيمة فلطية الانهيار. وباستمرار البحث في هذا الاتجاه تم بنجاح بناء معجل ٢٫٤ م إف بتطوير عمود عازل استخدم تقريباً في جميع المعجلات اللاحقة ذات الغاز المضغوط. وقد أدت هذه التطويرات في عام ١٩٤٠ الى ٤٫٥ م إف بواسطة «هيرب» وآخرين[١١]. كما أعطت التجارب التي أجريت على هذا المعجل ثلاثيّ الاكليل (corona triode)، شكل ١ أ ٩، وكذلك استخدام التحليل المغناطيسي الالكتروستاتي لحزمة الأيونات من أجل تزويد اشارة تعطي تحكماً دقيقاً للطاقة عند تغذيتها لثلاثي الاكليل. ولقد أدت التطويرات الاضافية التي تبعت ذلك في المختبرات العديدة الى نشوء مولدات الكتروستاتية بطاقات أعلى الى أن تم التوصل الى حوالي ١٢ م إف، كما ذكر في الجزء السابق.

ونلاحظ أن أي تطويرات للارتفاع بطاقة المولد الالكتروستاتي تكون مقيدة بسبب الصعوبات التالية:

١ ـ هناك مشاكل تعود الى الغاز العازل وتشكيل الأقطاب وذلك نظراً لأن «الانهيار» يحدث من قطب الى قطب خلال الغاز العازل. وبالرغم من أن استخدام سادس فلوريد الكبريت قد ساهم بقدر كبير في حل مشاكل العزل الا أن مهمة الحصول على أفضل شكل وتنظيم للأقطاب (optimization) قد وجد أنه يشكل مشكلة صعبة، كما أن أشكال الأقطاب المحسوبة لتصميم يعطي أدنى المجالات قد وجدت غير ناجحة في منح أقصى فلطية.

٢ ـ لم يمكن تحاشي قفز الوميض على طول العوازل عن طريق زيادة ضغط الغاز. ومع ذلك فقد ووجهت صعوبات قليلة نتيجة الانهيارات الداخلية للعوازل الصلبة. ومن ناحية أخرى تم انجاز وسائل مرضية لتقسيم الدعائم العازلة ولتوزيع الجهد بما يعطي ميلاً كهربياً منتظماً وذلك لتقليل قفز



شكل (١ ـ أ ـ ٩)

نظام تحكم الطاقة في معجل ايونات موجبة

الوميض. وقد كان الحد الأقصى للميل في المعجلات المنشأة جيداً هو ٥٠٠ ك ف / قدم.

٣ ـ يحدث القفز الوميضي على طول السير الشاحن اذا لم ينظم بطريقة سليمة واذا كان تحميله ثقيلا. كما أن المشكلات الأخرى التي تُواجه من السير هي حساسيته للرطوبة، والقلاقل الميكانيكية التي توجد به، وتأثير الغبار والنّسالة (lint)، وأخيراً صعوبات الشحن وازالة الشحنة. كذلك من المعتاد أن يؤدي حدوث الشرارات الى تدمير السير.

٤ ـ ان المشكلات الحادة التي تتعلق بأنبوبة التعجيل لم تكن قد فهمت باتقان في التطوير المبكر للمعجلات. ومع أن إستخدام الشمع وحلقات المطاط واللاصقات في مانعات التسرب في التفريغ قد أدت دورها بطريقة مرضية في معجلات الأيونات الموجبة، إلا أنه كان يوجد قيود في المعجلات التي يكون تشغيلها عند ضغوط منخفضة مع وجود دلائل على أن الفلطية تتغير لا خطياً مع الطول، فضلاً عن قيود تعود الى التحميل الالكتروني.

وفي ضوء الصعوبات الموضحة أعلاه كان من الجلي أنه لا بد من ادخال تقنية جديدة على المعجلات اذا أريد تحقيق أي تطوير اضافي بحيث يمكن التوصل الى فلطية أعلى من أجل تطبيقات أكثر للمعجلات **الالكتروستاتية**. كان لا بد من استبدال السير الشاحن، وان تُطَوَّر طريقة للشحن أكثر جدارة بأن يعوّل عليها. كذلك فان أنبوبة التعجيل التي جرت العادة على طلائها بطبقات من المواد العضوية كان عليها أن تخضع لتطوير جديد يقضي على المشكلات البالغة الإرباك المتعلقة بنظافة المسطحات.

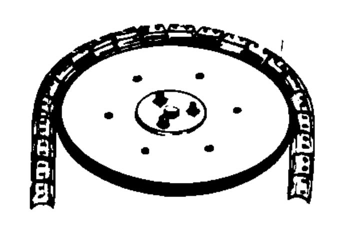
وهنا يذكر أن معظم التقنيات الحديثة للمعجلات التي أدت الى تقليل ـ أو

حتى منع - الصعوبات السابق ذكرها قد أدت الى نشوء معجل « بيليترون »(*) الالكتروستاتي[١٣] . فقد تم ادخال تحسين شامل على نظام الشحن باستبدال سير الفان دي جراف بسلسلة قوية التماسك تتكون من اسطوانات معدنية (كريات من الصلب) تتصل بروابط من البلاستك الصلب العازل مع وجود فجوات بين الاسطوانات المعدنية تعمل كفجوات شرارية تزود حماية جيدة للروابط العازلة. على أن عمليات الشحن وتفريغ الشحنة تتم بالحث عندما تمر الكريّات فوق البكرات كما نرى في شكل ١ أ ١٠ . وفي هذه الحالة تكون السلسلة الشاحنة خالية من المتاعب التي تواجه السير، فهي تعطي عمراً أطول كما تقل تموجات فلطية الطرف. انها تزود التيار بكفاءة وبفقد للغاز أقل كثيراً عما يحدث في حالة السيور. لذلك يمكن أن يزود تيار شاحن أكبر بقدرة داخلة ذات قيمة متواضعة نسبياً ودون الحاجة الى إدخال مشكلة تبريد صعبة.

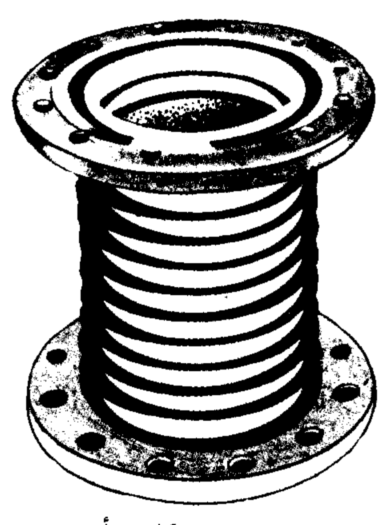
وتبنى أنابيب التعجيل من المعدن والسيراميك وهي تحمّص الى درجات حرارة معتدلة، ويمكن تشغيلها عند ضغوط اقل من تلك المستخدمة عادة في الأنابيب المحكمة الاغلاق باللاصقات العضوية وذلك بمعامل يصل الى ١٠٠ تقريباً. ولهذا فائدة عظمى لتطبيقات التيار الكبير حيث الالكترونات المتدفقة في الاتجاه الخلفي التي تحدث من تأين جزيئات الغاز يمكن أن تؤدي الى تيار استنزاف كلي أكبر عدة مرات من تيار حزمة الأيونات.

والميزة الأخرى لمعجل «البيليترون» أن أنبوبة التعجيل به مصنعة من أقسام قصيرة تربط بمسامير مصوملة (شكل ١ أ ١١)، على أن يتم استبدال أي جزء منها دون ازالة الأنبوبة بأكملها من المعجل، وهكذا تقل التكلفة وتتوفر الثقة في الاداء. وتتكون أنبوبة تعجيل «البيليترون» من وحدات

(*) بيليترون (Pelletron) مشتقة من كلمة (Pellet) أي كريّة نسبة الى الكريات المستخدمة كبديل للسير العادي المستخدم في الفان دي جراف.



شكل ١ أ ١٠



شكل ١ أ ١١

باذن من الكتروستاتيكس انترناشيونال

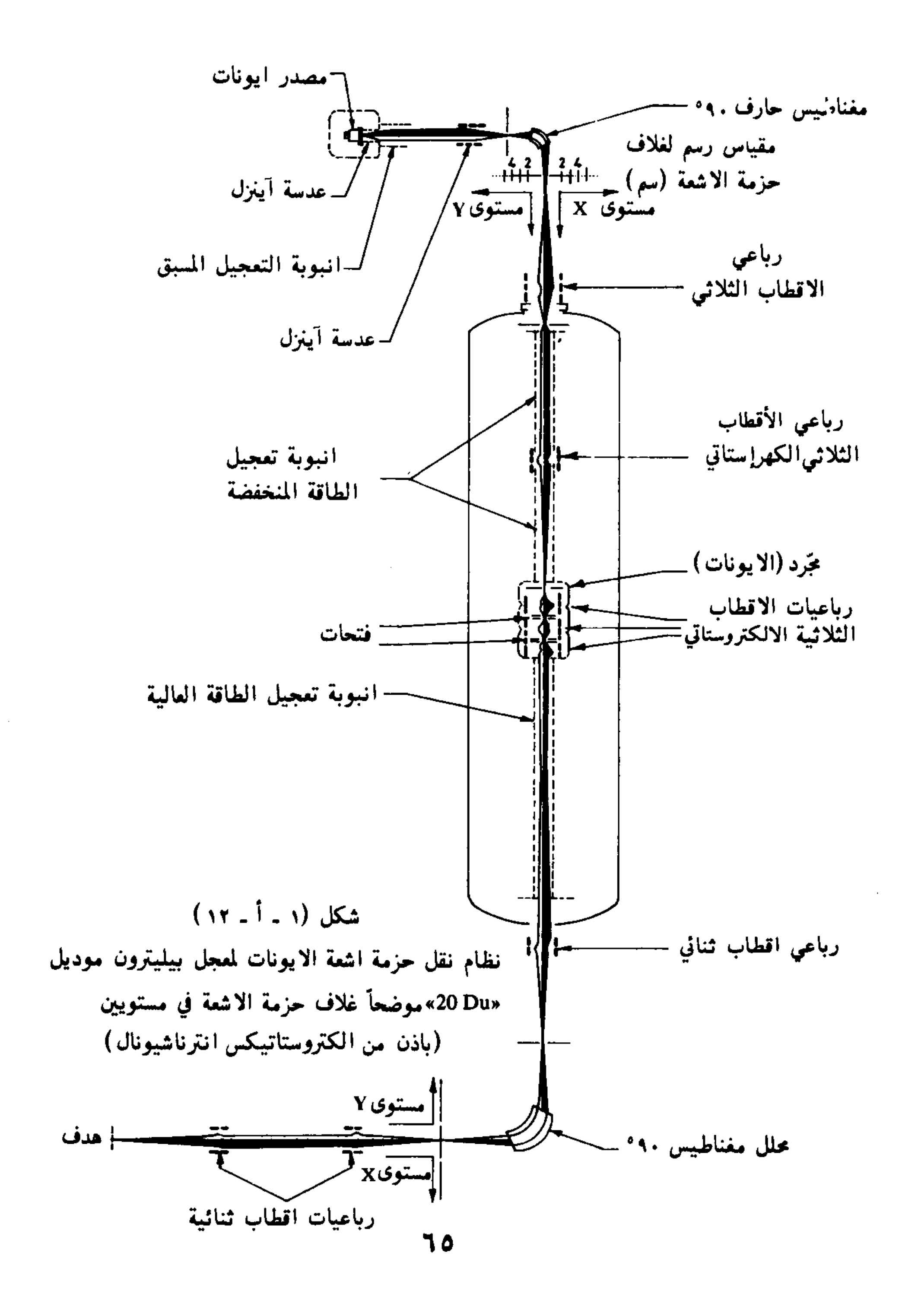
(modules) جهدها (واحد) م ف ، ويتكون كل جزء من أربعة دعائم عازلة أو أكثر تربط بصلابة بمسامير مصوملة بين ألواح الاتصال. على أن هذه الدعائم تكون متماثلة وقابلة للتبادل ، وتزود لها وقاية من الموجات الاندفاعية (surges) بواسطة فجوات الشرارة الحلقية. كما يوجد مسخنات داخلية في الأنبوبة لتقوم بعملية اخراج الغاز (outgassing) الابتدائية ، وكذلك في مرحلة لاحقة للتسخين المتقطع أو المستمر الذي يكون مطلوباً لمنع التلوث بواسطة أيونات بعض العناصر الثقيلة.

وصف معجل « البيليترون » :

يتكون المعجل من الأجزاء الآتية (شكل ١ أ ١٢):

١ - مصدر الأيونات ، وهو من نوع « ديوبلازماترون » القادر على توليد العديد من أصناف الأيونات الموجبة المناسبة لجميع الغازات تقريباً التي تكون أيونات سالبة مستقرة . ويمكن تشغيل حزمة التيار المستخلصة من المصدر كتيار مستمر أو نابض . ويستخرج التيار من المصدر ليدخل عدسة آينزل (einzel lens) لتركيز الحزمة بما يتناسب مع فتحة قاطع الحزمة (beam chopper) . ثم تحقن الحزمة داخل المعجل الأمامي الذي يعطى حزمة طاقتها حوالي ١٥٠ ك إف ، ويركز في عدسة « اينزل » ثانية ليمر خلال فتحة المرئي قبل أن تحرف في مغناطيس حارف ٩٠°. وتوضع فتحة ثانية عند نقطة الصورة للمغناطيس الحاقن الذي يكون في حالة بيليترون طراز « ١٤ دي يو » بقيمة $\frac{ك طا}{د^٢}$ = ٦٠ . وتسمح خاصية التركيز المزدوج للمغناطيس بأن يتم تركيز حزمة الأيونات المنخفضة الطاقة عند مكان يتيح وضع مجمِّع الكلايسترون (buncher) اللازم للتشغيل النابض للحزمة . وبعد ذلك تنقل الحزمة داخل رباعي القطب لتحسين نقل الحزمة الى المعجل . وللأخير خزان من الصلب يجب أن يكون تشطيب أسطحه الداخلية ناعماً وخالياً من الفجوات والخدشات والحراشف لتجنب تفريغات الاكليل . ويتكون العمود العازل الذي يرتكز عليه طرف الفلطية العالية من أعمدة سيراميك رقائق الألومونيوم المضغوط بأربطة جميعها من المعدن .

وتستخدم أطواق على طول الأعمدة العازلة ليقيم المسطحات المتساوية الجهد ، كما تزود منطقة قصيرة في عمود الطاقة المنخفضة للمضخة الأيونية بأقطاب تزيل الغاز (getter) ، ويعمل نظام نقاط الاكليل المتواجد في المعمل



شكل (١ - أ - ١٢)

نظام نقل حزمة اشعة الايونات لمعجل بيليترون موديل «20 Du» موضحاً غلاف حزمة الاشعة في مستويين (باذن من الكتروستاتيكس انترناشيونال)

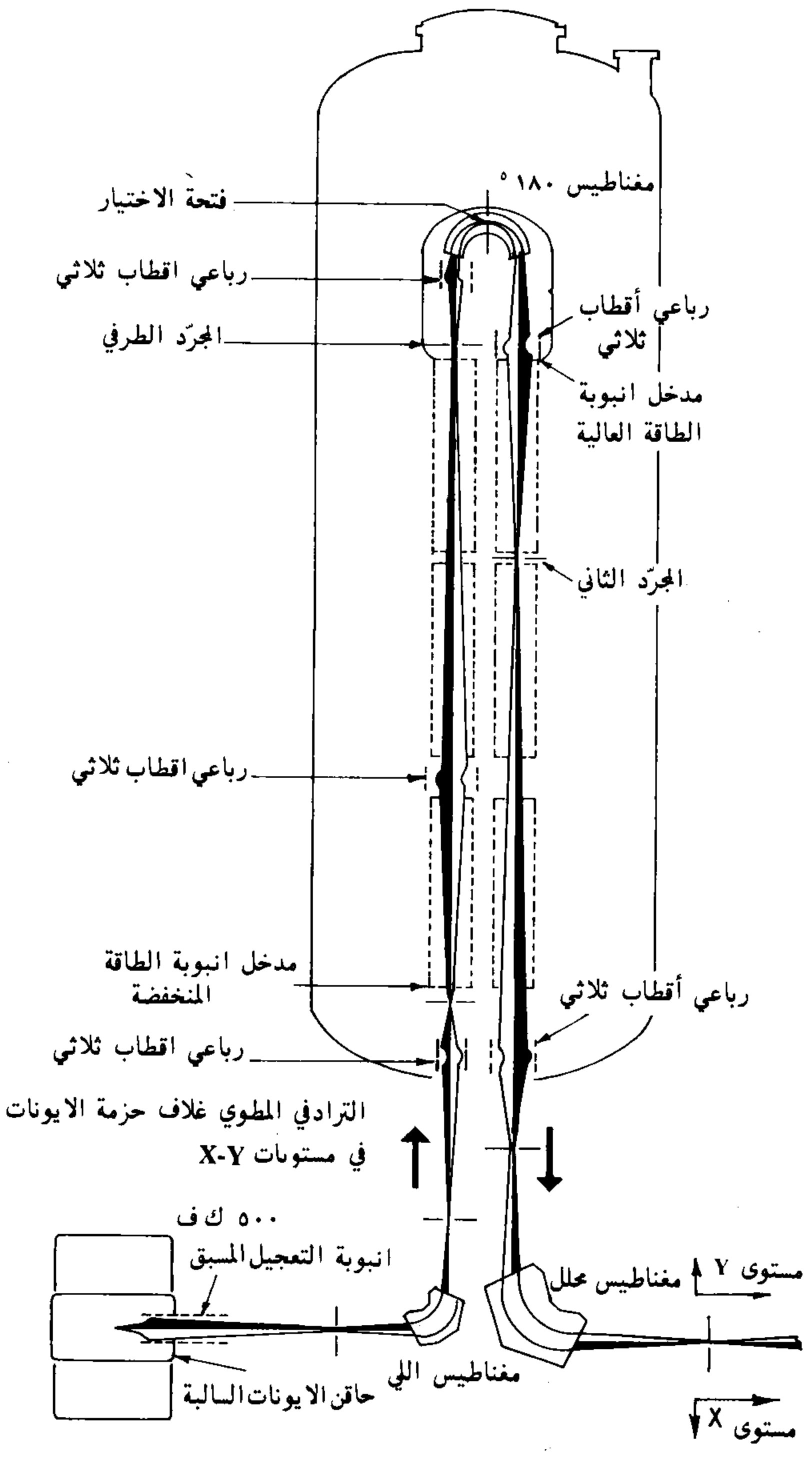
على توزيع الجهد على طول أنبوبة التعجيل والعمود. ويكون تشغيل نظام الاكليل عند ضغوط غازية مستقلة عن ضغط كب فل$_{٢}$. وتوصل أنابيب التعجيل والعمود كهربياً على طول مسطحات متساوية الجهد في العمود عند مسافات متساوية.

هذا وتزود استقرار فلطية الطرف بنظام للتغذية الخلفية يستخدم اشارة من الفتحة تأتي من المغناطيس المحلل وثلاثي الاكليل المواجه للطرف، ومن المستطاع في هذه الحالة تبيان فلطية الطرف بقياس دقيق - عن طريق الفولتيمتر المولد - للمجال الكهربي الكائن عند حائط الخزان المواجه للطرف. ويوجد داخل الطرف أنظمة التجريد (stripping) الغازي أو باستخدام الرقائق. وتواصل حزمة الأيونات اندفاعها من أنبوبة تعجيل الطاقة العليا الى رباعي القطب المزدوج ليتم تركيزه على فتحة قبل أن يدخل مغناطيس التحليل ذي ٩٠° من نوع التركيز المزدوج بحاصل ضرب للكتلة والطاقة قيمته $\frac{ك ط_ا}{د^{٢}}$ = ٤٠٠ في حالة بيليترون ٢٨ - م إ ف (لأيونات مفردة الشحنة). وفي طريقه الى الهدف تُركّز حزمة الأيونات مرة أخرى في رباعيين للأقطاب من النوع المزدوج.

البيليترون الترادفي المطوي (Folded):

ان المعجل الترادفي الذي وصفناه فيا تقدم يعطي طاقة مضاعفة مرتين لأيونات الايدروجين وطاقة تضاعف أعلى بكثير في حالة الأيونات الثقيلة، لذلك فان معجلا بطرف ذي فلطية قدرها ٢٠ م ف يعطي بروتونات طاقتها ٤٠ م إ ف. ولقد طورت هيئة «ناشونال الكتروستاتكس» معجل بيليترون الترادفي المطوي وذلك بالنسبة للمعجلات التي يكون جهد طرفها حوالي ٢٠ م ف أو أعلى[١٣]، كما نرى في شكل ١ أ ١٣.

فالحزمة الأيونية التي تحقن من أسفل المعجل يتم تجريدها في الطرف، ثم

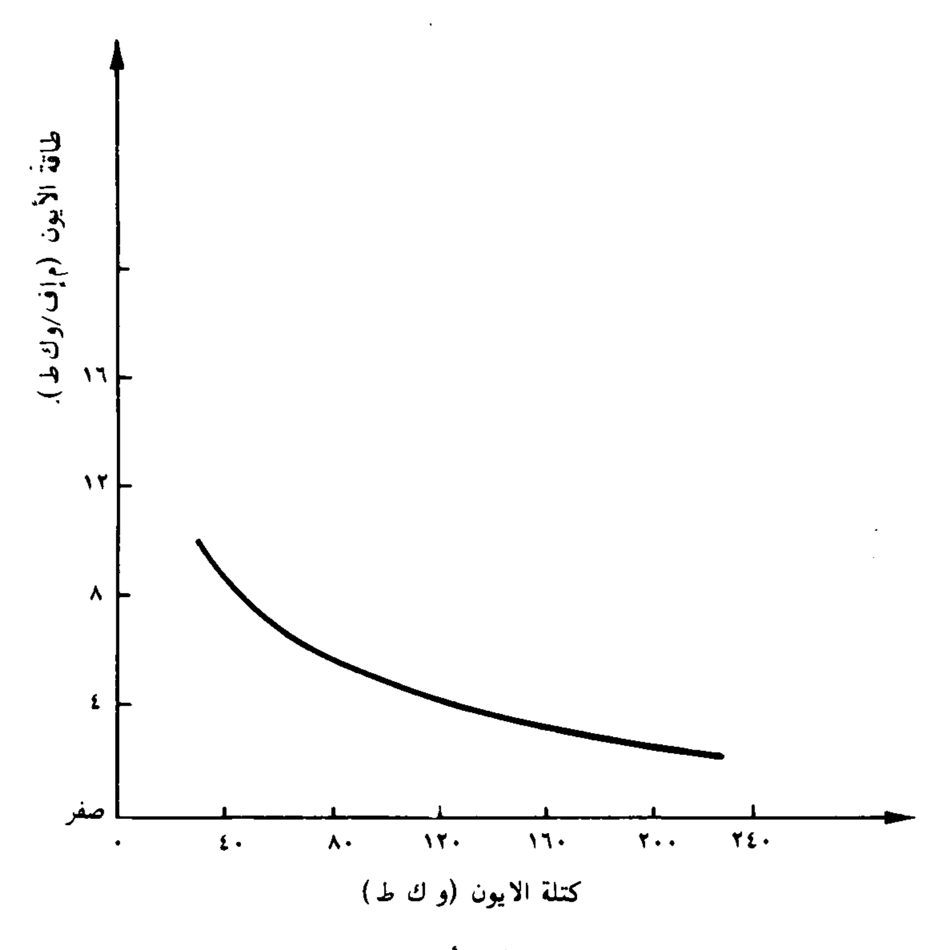


شكل ١ ـ أ ـ ١٣ (باذن من الكتروستاتيكس انترناشيونال)

تحرف ١٨٠° وتعاد الى قاعدة المعجل للتحليل والاستخدام. ويلاحظ أن تصميم المعجل الترادفي المطوى يقلل تكاليف المبنى بسبب انخفاض طول المبنى وقلة تعقيداته. كذلك يعطي هذا التصميم وفراً في تكاليف الخزان، وفي غاز كب فل٦ ومعدات التداول. كما أنه يقدم المزايا الاضافية المتمثلة في الوضع المريح لمصدر الأيونات، والاختيار الممتاز لحالة الشحنة، وبعض التقليل في الطاقة المختزنة. غير أن العيب الذي يعاني منه معجل الترادف المطوي هو الميول السطحية المتزايدة على (gradients) **أعلى الطرف**.

ويحتوي المعجل الترادفي المطوي على ثلاثة مغناطيسات: الحاقن، محلل الطرف، وحزمة الأيونات، كما يضم ستة عدسات رباعية الأقطاب.

هذا ويبدو أن فلطية الطرف القصوى التي أمكن تحقيقها هي ٢٥ م ف[١٣] بما يعني امكان تعجيل الجسيمات احادية الشحنة الى ٥٠ م ف، أما بالنسبة للايونات الأثقل فان الطاقة لوحدة الكتلة الذرية تتوقف على كتلة الأيون، كما يرى في شكل ١ أ ١٤[١٤] الذي يوضح أن الطاقات في مدى مئات المليون فلط الكتروني يمكن الحصول عليها للايونات الثقيلة. وهكذا يبدو انه بالترادفيات المطوية تكون كثيراً من التطويرات التقنية الحديثة قد تحققت في مجال معجلات التيار المستمر الصغيرة.



شكل (١ ـ أ ـ ١٤)
اعتماد طاقة الايون على كتلته (مرجع ١٤)

المراجع

١ - J.D. Cockfroft and ETS Walton, Proc Roy Soc (London), A136: 619 (1932); A137: (1932); A144: 704 (1934)

٢ - P. Lorrain, R. Beique, P. Gilmore, P.E. Girard, A. Breton, and P. Piche, Can. J. Phys., 35: 229 (1957).

٣ - «High Power Cockroft - Walton Generator», G. Reinhold, K. Trumpy and R Gleyvod, IEEE Trans: Nucl Scie, Vol. NS_18, No 3 June 1971

٤ - «High Voltage DC Power Supplies for Beam Injectors», G. Reinhold, K. Trumpy, IEEE Trans Nucl. Scie, Vol NS - 16, No.16 June 1969.

٥ - R.J. Van de Graff, **Phys** Rev., 38: 1919 A (1931).

٦ - L.C. Atta, D.L. Lorthrup, RJ. Van de Graff, and C.M. Van Atta, Rev. Sci. Instr., 12: 534 (1941).

٧ - M.A. Tuve, L.R. Hafstad, and O. Dahl, Phys. Rev., 48: 315 (1935).

٨ - H.A. Barton, D.W. Mueller, and L.C. Van Atta, Phys. Rev., 42: 901 A (1932).

٩ - «Particle Aceelerators», M.S. Livingston, J.P. Blewett Mc. Graw - Hill Book Company, 40 (1962).

١٠ - E.I. Rogers and C. Turner, Rev. Sci. Instr., 21: 805 (1955).

١١ - R.G. Herb, C.M. Turner, C.M. Hudson, and R.E. Warren, Phys. Rev., 58: 579 (1940).

«Proposal for High Energy Tandem Van de Graff», ORNL Proposal, March 1, 1967 ١٢

P.H. Stelson, The New Heavy_Ion Accelerator Facility at Oak Ridge, Proc. of the 3rd Conf. on Appl. of Small Accelerators, North Texas State Univ. Oct. 1974, Conf. 741040_p2, pp.1 ١٣

«The Heavy Ion Accelerator Facility at Oak Ridge», P.H. Stelson, Proceedings of the 3rd Conference on Application of Small Accelerators, Vol II, North Texas University, 1974, p.7 ١٤

١ ـ ب المعجلات الدورية

١ ب ١ السيكلوترون

مقدمة :

لقد كان السيكلوترون معجلاً ذائع الصيت ، وهو يعتمد على مبدأ الرنين المغناطيسي (magnetic resonance) ، وقد سمي لهذا السبب « معجل الرنين المغناطيسي » . إقترح هذا المبدأ « لورانس » في عام ١٩٣٠[١] في أعقاب تجربة « وايدرو » في عام ١٩٢٨ الذي عجل أيونات بمجال متذبذب موضوع على قطبين اسطوانيين في خط واحد ، وبهذا تكتسب الأيونات طاقة تعادل ضعف الفلطية المترددة . وقد أثبت لورانس دوران الجسيمات في رنين مع فلطية التعجيل المترددة تحت تأثير مجال مغناطيسي يستخدم قطباً قطره ٤ بوصات وجهد التردد العالي قيمته ٢٠٠ ڤلط ، وحصل على ذروات حادة للتيار المجمّع من يد$_٢^+$ ويد$^+$ عند مجال الرنين المغناطيسي . وعندما قيست طاقة الجسيمات المعجلة وجدت مساوية لـ ٨٠ ك إف . على أن المحاولة الثانية التي أسفرت عن أول سيكلوترون عملي أنتجت بروتونات طاقتها أكثر من واحد م إف بمغناطيس قطره ١٠ بوصة[٣] ، ثم قام لورانس بعمل تصميم لسيكلوترون الـ « ٢٧ ـ بوصة » الذي أنشىء في عام ١٩٣٣ والذي نجح في تعجيل ديوترونات الى طاقة قدرها ٥ م إف[٤] . ثم تحقق تطوير اضافي بزيادة قطر أوجه الأقطاب الى ٣٧ بوصة وزيادة طاقة السيكلوترون الى ٨ م إف . وفي جامعة كاليفورنيا استكمل بناء سيكلوترون ٦٠ بوصة الذي بدأ بطاقة ١٦ م إف ، ثم طور ليعطي ديوترونات ٢٠ م إف أو أيونات هيليوم طاقتها ٤٠ م إف . وقد اعتبر هذا النوع الدولي للسيكلوترون الحديث النمط القياسيَّ الذي كان في ذلك الوقت الانتاج المشترك لعدة مختبرات ولكثير من مجهودات المساهمات الفردية . ومنذ عام ١٩٣٩ بنيت سيكلوترونات كثيرة بواسطة عدة مختبرات وشركات تجارية في أجزاء متفرقة من العالم . وكذلك فإن الكثير من التحليلات

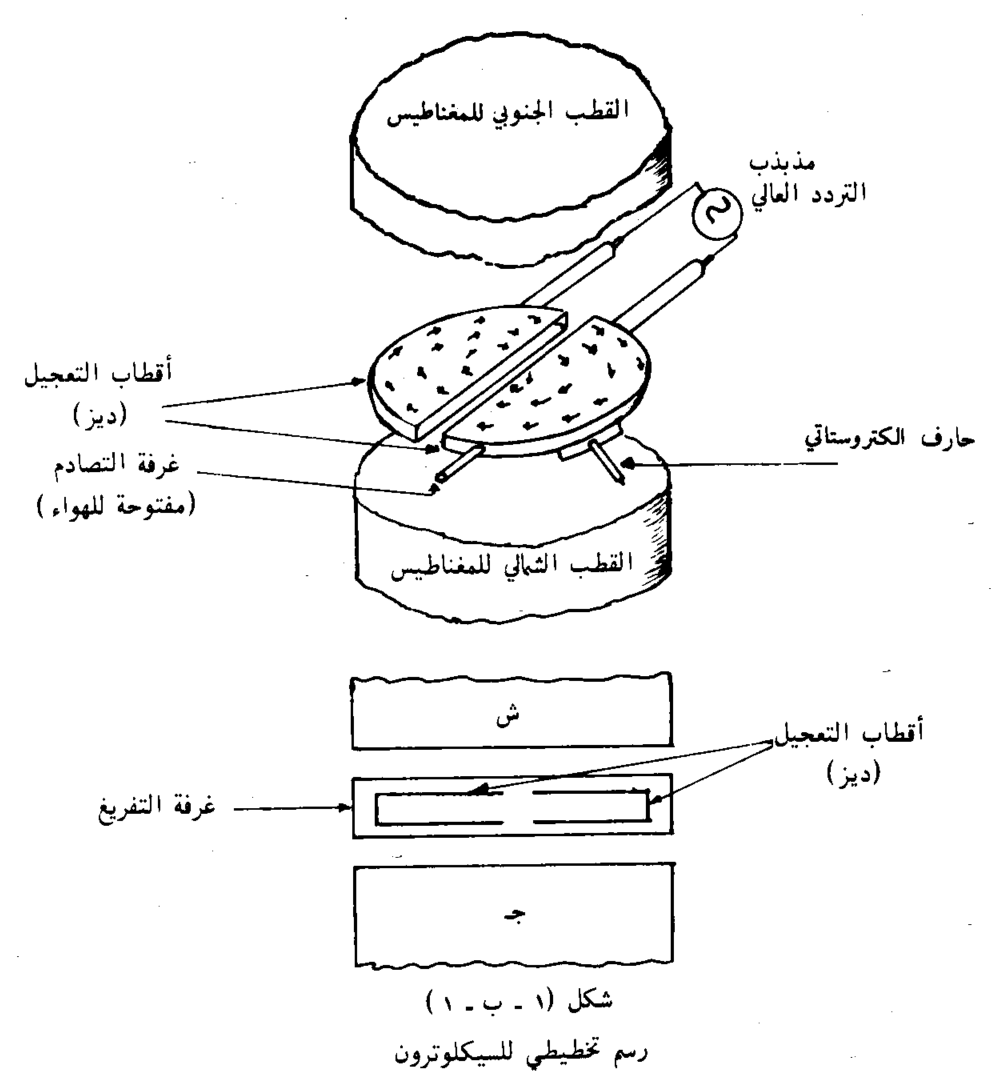
النظرية الشاملة(٦) لمبدأ عمل السيكلوترونات ، والتركيز الكهربيّ والمغناطيسيّ وديناميكية الجسيمات قد أعطت قاعدة صلبة لتصميم السيكلوترون الحديث ، ذي الطاقة العالية والكثافة الكبيرة .

ولعل تطوير مصادر الأيونات المتضاعفة الشحنة قد أعطت السيكلوترونات أهمية خاصة فيما يتعلق باستخدامها كمعجلات للأيونات الثقيلة ، فتعجيل الأيونات المتضاعفة الشحنة ، مثل $ك_{١٢}^{+++}$ ، يعطي طاقة بقيمة مضاعفة للأيون الفردي الشحنة الذي يكون له نفس نسبة « الشحنة الى الكتلة » (ثلاثة أضعاف طاقة $هي^{+}$ في هذا المثل) ، ومستخدمة نفس قيم التردد والمجال المغناطيسي .

مبدأ التشغيل :

تحقن الأيونات من مصدر أيونات يقع في مركز السيكلوترون بحيث تعبر عدة مرات فجوة بين قطبين مجوفين من النحاس مرتكزين داخل غرفة تفريغ موضوعة بين أقطاب كهرمغناطيسي يقوم بتزويد مجال مغناطيسي متناسق بشكل تقريبي . وتتشكل الأقطاب مثل الحرف D ، وهي لذلك يشار اليها باسم « الديّز » (Dees) ، شكل ١ ب ١ .

هذا ويوضع جهد متردد بذبذبة عالية بين « الديّز » بحيث تكتسب الأيونات طاقة متطابقة لقيمة هذا الجهد ، وتدخل الأيونات قطب التعجيل (الدي) الذي يعتبر محجَّباً من تأثير المجال الكهربي ، ثم تتبع مساراً نصف دائري ناتج عن التفاعل مع المجال المغناطيسي العمودي . وبعد ذلك تدخل الأيونات الفجوة الواقعة في الاتجاه المضاد في الوقت الذي يكون فيه المجال الكهربي قد عكس اتجاهه ، أي بعد ١٨٠° ، ويستقبل كمية مساوية من الطاقة ، ثم يدخل القطب (الدّي) الثاني ليرسم مساراً ثانياً نصف دائري بقطر اكبر . وهكذا تواصل الأيونات حركتها اللولبية تحت ظروف الرنين حيث تكون فترة دوران



شكل (١ - ب - ١)

رسم تخطيطي للسيكلوترون

الأيون مساوية للزمن الدوري الخاص بمجال تردد الراديو، الى أن تصل الأيونات الى المحيط الخارجي للأقطاب مزودة بطاقتها النهائية. هذا ويمكن الحصول على تردد الدوران بمساواة القوة المغناطيسية بالقوة الطاردة المركزية:

$$ش_{أ}\,ع\,مج_{م} = \frac{ك}{نق}\,ع^{٢} \qquad (١)$$

حيـــث مجم = شدة المجـــال المغنـــاطيسي ، ع = سرعـــة الأيون ، شأ = شحنة الأيون ، ك كتلته ، نق = نصف قطر المسار الدائري . لذلك فإن :

$$\frac{ع}{نق} = \omega = ٢ \; ط \; د = \frac{مج_م \, ش_أ}{ك} \text{، أو}$$

$$د = \text{تردد الدوران} = \frac{ش_أ \cdot مج_م}{٢ \; ط \; ك} \qquad (٢)$$

حيث ط = النسبة التقريبية

من ذلك يتضح أن تردد الدوران يكون ثابتاً في المجال المغناطيسي الثابت (المتناسق) كلما كانت الكتلة ثابتة . واذا كانت ف هي متوسط فرق الجهد خلال فجوة التعجيل ، وكانت ن عدد مرات التعجيل ، فان طاقة الجسيم النهائية تكون :

$$طا = ن \; ش_أ \; ف = ١/٢ \; ك \; ع^٢ \qquad (٣)$$

ومن المعادلة (١) تكون الطاقة الحركية لوحدة الشحنة هي :

$$\frac{طا}{ش_أ} = ١/٢ \; مج_م^٢ \; نق^٢ \; \frac{ش_أ}{ك} \qquad (٤)$$

ويرى من المعادلة (٤) أن الطاقة الحركية لوحدة الشحنة تتناسب طردياً مع مربع كمية التحرك بدلالة مج نق للأيونات المختلفة (مثلا بالنسبة للديوترونات تكون $طا = ١٫٥٦ \times ١٠^{-٤} \; مج_م^٢ \; نق^٢$ ، حيث $مج_م$ بالكيلوجاوس ونق بالبوصة) . تستخدم العلاقات السابقة لتعيين حجم مغناطيس السيكلوترون ، ونظراً لأن المجال المغناطيسي يكون متناسقاً ، لذلك فإن نصف قطر أوجه الأقطاب يجب أن يكون أكبر من « نق » (بحوالي نصف طول الفجوة) . ولما كانت القيمة القصوى للمجال المغناطيسي يحدها تشبع حديد المغنـــاطيس فـــإن الطـــاقـــة القصوى تتوقـــف عـــلى مربـــع نـــق

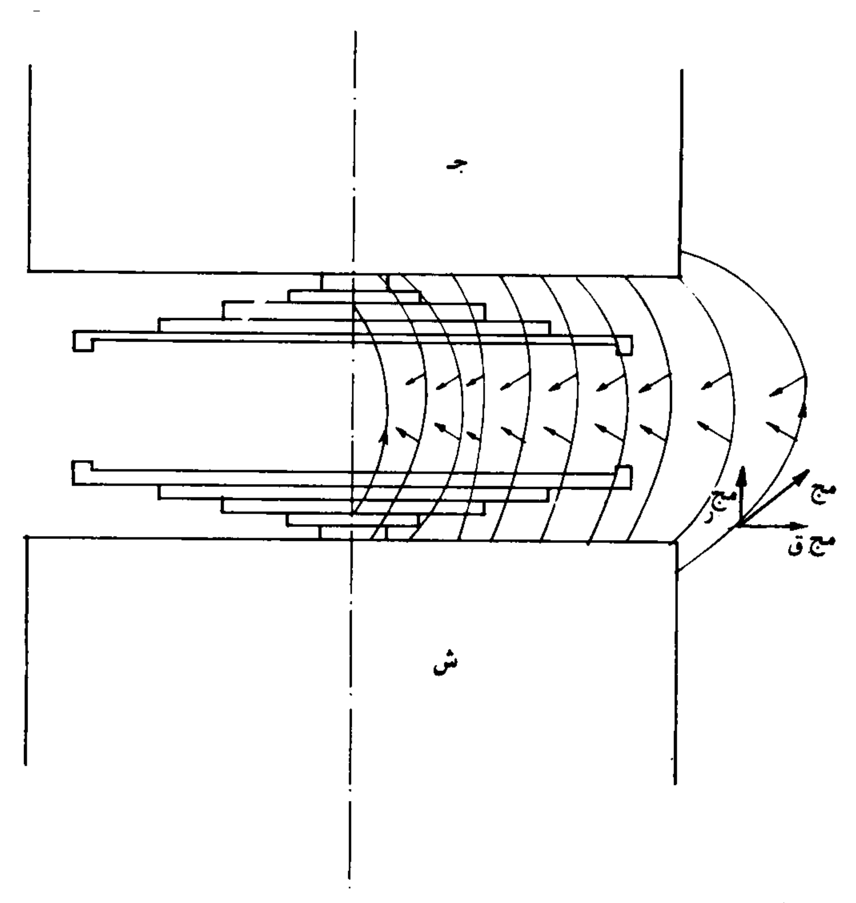
$= \frac{\text{١}}{\text{مجم}} \left(\frac{\text{٢ك}}{\text{شأ}} \text{ ف} \right)^{\text{١/٢}} \text{ن}^{\text{١/٢}}$. على أن اعتماد « نق على $\text{ن}^{\text{١/٢}}$ يجعل أنصاف قطر المسارات المتتالية تقترب أكثر كلما صارت ن أكبر.

التركيز المغناطيسي والكهربي:

ان مبدأ الرنين الأساسي ينطبق على الحالة المثالية للجسيات التي تأخذ مسارها في المستوى الأوسط (median plane) للسيكلوترون والتي تعبر فجوة التعجيل في تزامن مضبوط مع مجال تردد الراديو (radio frequency) ومع ذلك تنحرف معظم الأيونات عن هذه الظروف المثالية ولكنها تؤدي ذبذبات حول المستوى الأوسط بما يجعلها تخضع لنوع من التقييد حول هذا المستوى.

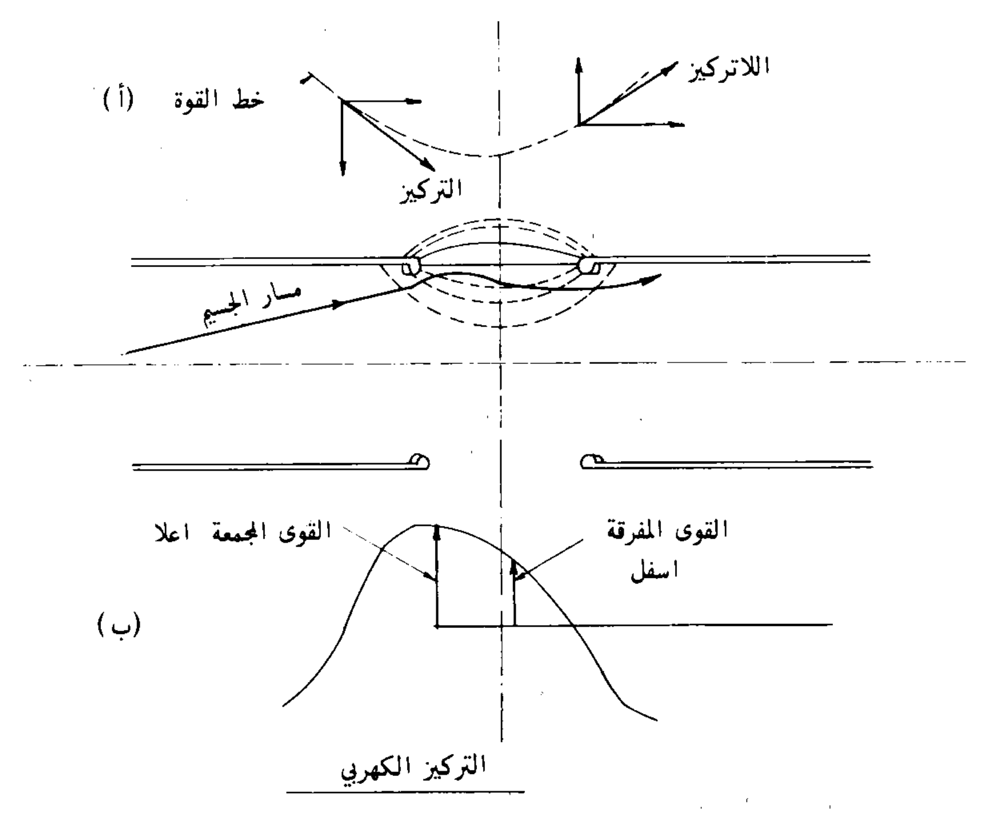
وفي حالة المجال المغناطيسي المتناسق تكون خطوط المجال متوازية وينعدم الإنحراف الرأسي أو التركيز، ويلاحظ أن التركيز المغناطيسي ينتج من التقليل البسيط للمجال المغناطيسي مع ازدياد نصف القطر. وهذا يعود الى انبعاج (fringing) خطوط المجال الذي يعزز بتشكيل أوجه القطب بحيث تتسع الفجوة كلما ازداد نصف القطر، كما يرى في شكل ١ ب ٢، فالجسيات التي تنحرف عن المستوى المتوسط تعاد بواسطة قوى الاسترجاع الناتجة عن مركبة المجال القطرية التي تزيد مع كل من نصف قطر المغناطيس والازاحة عن مدار التوازن.

هذا ويمكن أن نفهم التركيز الكهربي بالرجوع الى شكل ١ ب ٣[٧]، فالأمر هنا يتضمن عمليتين: الأولى تعود الى حقيقة أن الأيونات تعجّل الى سرعات أعلى خلال مرورها عبر الفجوة، وهكذا فان الوقت الذي تمضيه عند دخولها في المجال المجمِّع يكون أطول منه في المجال المفرق (أ في الشكل). ويكون هذا التأثير محسوساً بشكل أكبر في التعجيلات المبكرة عندما تكون طاقة الأيون منخفضة بحيث يصير التغيير في السرعة أكثر أهمية. والعملية الثانية هي أن الجسيات التي تعبر الفجوة تقع تحت تأثير مجال كهربي يتغير أثناء زمن العبور:



شكل (١ ـ ب ـ ٢) التركيز المغناطيسي

فعندما تتناقص قيمة المجال الكهربي في هذا الجزء من دورة « تردد الراديو » تكون قوة التجميع عند دخول الفجوة أضخم في قيمتها من قوة التفريق عندما تترك الأيونات الفجوة بحيث تكون النتيجة الاجمالية هي تجميع حزمة الأيونات. وخلال الربع الآخر من نصف الدورة المتردد تنعكس التأثيرات وتكون النتيجة تفريق الأيونات. على أن قيمة هذا التأثير «لتغيير المجال» يقل كذلك بزيادة طاقة الجسيم ونصف قطر المدار نظراً لأن الوقت الذي يمضيه الجسيم في عبور الفجوة، وبالتالي قيمة تغيير الجهد الكهربي، يصير أقل. وتكون



شكل (١ ـ ب ـ ٣) التركيز الكهربي

النتيجة الاجمالية لهذين التأثيرين الرئيسيين تركيزاً فعالاً خلال المراحل المبكرة للتعجيل فقط ولجسيمات تقع خلال مدى للطور (phase) محدد بعض الشيء.

ويعطي المرجع رقم (٧) النظرية التفصيلية لعلاقات الطور.

هذا وينبغي أن تتخذ عناية خاصة في تصميم غرفة التفريغ التي تحتوي على الأقطاب (الديز) ومصدر الأيونات والأقطاب الحارفة لضمان أحكام عدم التسرب بالتفريغ والمتانة الميكانيكية لمقاومة الارتباك عندما تكون الأجهزة تحت تأثير التفريغ. فهي تصنع من مادة غير مغناطيسية من أجل منع أي إزعاج للمجال المغناطيسي المتماثل كما ينبغي أن تكون ذات موصّلية عالية

لتعطي مقاومة منخفضة لتيارات « تردد الراديو » . هذا وتحتوي المراجع المختلفة على التفصيلات الانشائية لغرفة التفريغ ولأقطاب « الديز » والمغناطيس ومصدر الأيونات وجميع المعدات الاضافية الأخرى .

الحد من طاقة السيكلوترون :

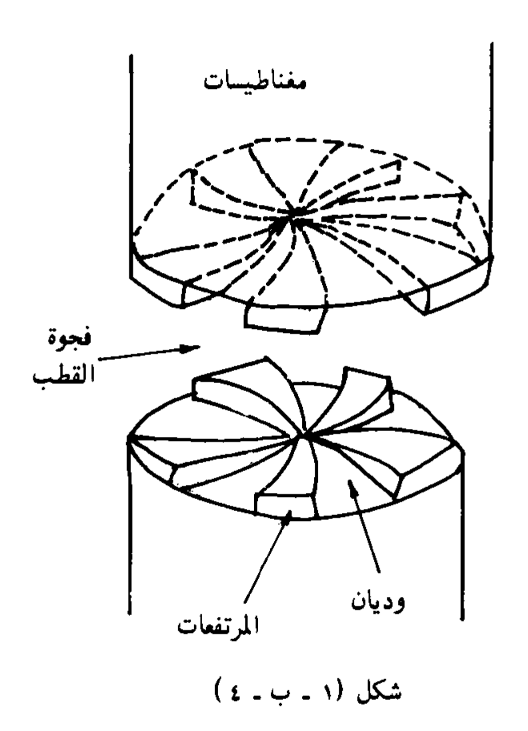
إن حالة التزامن بين تردد دوران الجسيمات المعجلة ، $د = \frac{مج_{م} ش أ}{٢ ط ك}$ ، وتردد المجال ذي تردد الراديو المعجل يحدث فيها اعاقة بواسطة تأثيرين يتحدان لتقليل تردد دوران الجسيمات ، أولها الميل القطري السالب للمجال المغناطيسي الذي يلزم لتركيز حزمة الأيونات ، وثانيها الزيادة النسبية (relativistic) للكتلة كلما تزايدت الطاقة . وتبعاً لذلك فإن طاقة قصوى قدرها ٢٥ م إف (للبروتونات) تضع حداً لزيادة الطاقة في السيكلوترونات العادية . وقد أمكن التغلب على هذا التحديد فيما يسمى بالسيكلوترون المتزامن (Isochronous Cyclotron) وفي السينكروسيكلوترون .

١ ب ٢ السيكلوترون المتزامن

إذا أريد تحقيق الأحوال الفضلى من أجل عمل سيكلوترون ناجح ذي طاقة عالية فينبغي مواجهة مطلبين أساسيين متضادين : الأول في أنه يجب زيادة المجال المغناطيسي كلما ازداد نصف القطر وذلك للاحتفاظ بسرعة زاوية ثابتة للجسيمات حتى يمكن أن تتغلب على التزايد النسبي للكتلة وقدرها ١٪ لكل ١٠ م إف في حالة البروتونات ، والثاني في أن نقيد مدارات الجسيم الى جوار المستوى المتوسط ولهذا يجب أن يقل المجال المغناطيسي مع زيادة نصف القطر . ففي السيكلوترونات العادية والسينكروسيكلوترونات تكون التضحية بالسرعة الزاوية الثابتة حتى يمكن تلبية المطلب الأخير . في عام ١٩٣٨ أوضح « توماس »[٨] نظرياً أنه ينبغي أن يكون ممكناً مواجهة هذه المتطلبات الغير متنافسة على ما يبدو وفي وقت واحد . ويمكن أن يتم ذلك بالتخلي عن التصور

بأن المجال المغناطيسي يجب أن يقتني تماثلاً دورانياً ، وعوضاً عن ذلك يمكن تغيير المجال المغناطيسي بدلالة السمت (azimuth) بينما تزيد قيمته المتوسطة تجاه الحافة الخارجية . ولكي يضع هذا في التطبيق العملي اقترح توماس فكرة « تجميع القطاع » (sector - focusing) في السيكلوترون . وقد تطابق ذلك مع ارتباط مصممي السيكلوترونات الأوائل بمشكلة زيادة الحد من الطاقة القصوى فيما بعد تحديد الـ ٢٥ م إف التي فرضها التزايد النسبي للكتلة . ولذلك فان اقتراح توماس يعني استخدام مناطق للمجال المغناطيسي حول المدار عالية ومنخفضة بالتناوب ، أي « قمم » و« وديان » على التوالي ، مثلما يمكن الحصول عليه بمقاطع قطرية من الحديد مثبتة الى قطع الأقطاب لتعطي أطوال فجوة قصيرة وطويلة بالتناوب ،شكل ١ ب ٤ . وسوف يزيد ذلك بطريقة عملية من المجال المتوسط حول المدار عند أنصاف الأقطاب الكبرى بما يسمح بالاحتفاظ بحالة الرنين . وفي نفس الوقت يواجه الجسيم الذي يدور في هذا المجال المغناطيسي المتغير زاوياً قوى استعادة محورية تقوم بتزويد ثبات المدار المطلوب .

ومع أنه كان مقبولاً من الناحية النظرية ، إلا أن اقتراح المجال المتغير سمتيا (« م م س » Azimuthally Varying Field «AVF») لم يخرج الى حيز التنفيذ لعدة سنين بسبب حساباته المعقدة اذا قورنت بالعلاقات البسيطة المستخدمة بواسطة مصممي السيكلوترونات . على أنه مع التقدم الهائل الذي **أجري** بعد عام ١٩٤٩ على نظرية المدار تم استرجاع لمبدأ « م م س » وبدأت تصميات السيكلوترون المتزامن في أوائل الخمسينات . كذلك فان فوائد الضلوع اللولبية (ridges) على أوجه قطب السيكلوترون والتي تتميز على القطاعات الزاوية قد وُضِّحت بواسطة مجموعة « مورا » (MAURA) في أمريكا . وفي النهاية انبثق تطوير لفصيلة بأكملها من السيكلوترونات التي أعطيت الأسماء الآتية : المتزامنة ، المجمعة بالقطاعات (sector - focused) ، ذات القطب



شكل (١ ـ ب ـ ٤)

المشطور (split-pole) ، السيكلوترون الحلقي (ring cyclotron) ، سيكلوترون القطاعات المنفصلة ، أو المجال المتغير سمتيا (AVF) ، فبعضها يستخدم التغييرات القطرية للمجال والبعض الآخر التغييرات اللولبية . كما سنرى في شكلي ١ ب ٥ ، ١ ب ٦ على التوالي . على أن هناك صفة مشتركة لكل هذه الماكينات وهي استخدام تردد ثابت للتعجيل ينتج عنه « دورة شغل » كبيرة (large duty cycle) وكثافات كبيرة لحزمة الأيونات مميزة للسيكلوترون العياري . فالمتوسط الزمني لتيار حزمة الأشعة يكون أعلى مائة مرة تقريباً عنه للسينكروسيكلوترونات التي تعجل حزم أشعة نابضة باستخدام تعديل التردد (frequency modulation). والميزة الأخرى لسيكلوترون م م س هي أن طاقته الخارجة التي يمكن الحصول عليها تكون متغيرة ، ويتحقق ذلك باستخدام ملفات مشكلة كقطاعات لتتحكم في قيمة

التغير السمتي ، بالاضافة الى ملفات دائرية ذات أقطار مختلفة لتتحكم في الزيادة القطرية لمتوسط المجال . هذا ويمكن تزويد القدرة لهذه الملفات لتعطي مجالات التركيز الضرورية لأي طاقة خارجة يراد اختيارها ، وذلك حينما تتحد مع دوائر « تردد الراديو » التي يمكن تنغيمها على مدى مناسب للترددات . وعلاوة على ذلك يمكن استخدام التردد المتغير وخاصية المجال لتزويد مجال التركيز الصحيح من أجل تعجيل نوعيات مختلفة من الأيونات .

ان الطاقة القصوى التي يتيسر تحقيقها في سيكلوترون م م س تتوقف على « عدد الشحنة » (charge number) للأيونات الثقيلة المستعملة . لعل هذا يكون واضحاً من معادلة الطاقة في الحد الغير نسبي :

$$\text{طا} \approx \frac{\text{ع}_{\text{ص}}^{2}\,\text{مج}_{\text{م}}^{2}\,\text{نق}^{2}}{2\ \text{طا}_{\text{متوسطة}}}\ \frac{\text{ش}^{2}}{\text{ك}} \qquad (٥)$$

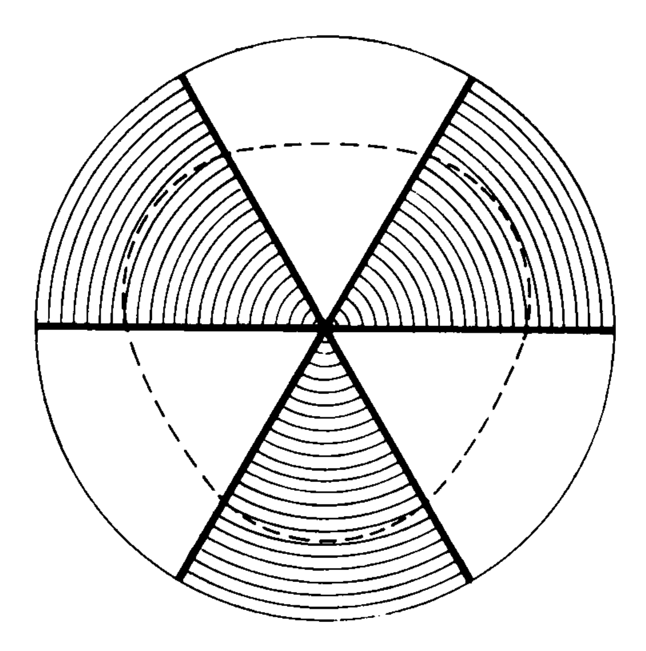
حيث طا = الطاقة الحركية للأيونات المعجلة ذات كتلة « ك » وشحنة « ش » ، $\text{مج}_{\text{م}}$ تمثل المجال المغناطيسي ، نق نصف قطر السحب (سحب الأيونات) ، $\text{طا}_{\text{متوسطة}}$ تمثل متوسط كتلة النيوكلون في النواة (طا ≪ ك $\text{طا}_{\text{متوسطة}}$ = كتلة السكون (rest mass) على أن النشرات العلمية للمعجلات تقدم غالباً الثابت :

$$\text{ث} = \frac{\text{ع}_{\text{ص}}^{2}\ \text{مج}_{\text{م}}^{2}\ \text{نق}^{2}}{2\ \text{طا}_{\text{متوسطة}}}$$

التي يبدو واضحاً أنها عدد مميّز للمعجل ، فالمعادلة (٥) يمكن أن تكتب هكذا :

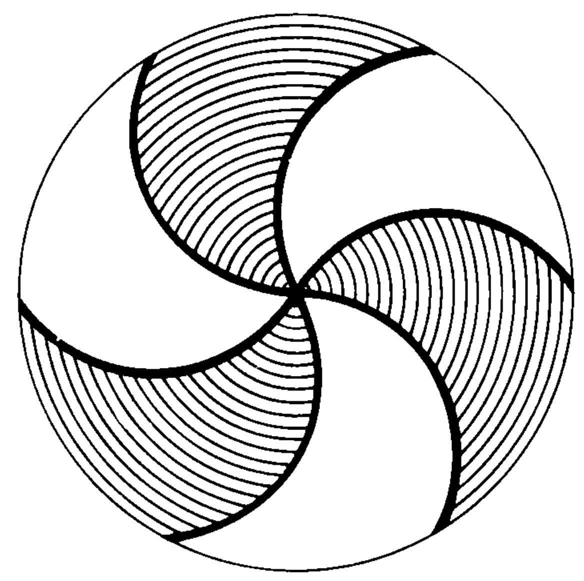
$$\text{طا} = \text{ث}\ \frac{\text{ش}^{2}}{\text{ك}} \qquad (٦)$$

وتبعاً لذلك ، وحتى يمكن تلبية رغبة الباحثين التجريبيين في الوصول الى



شكل (١ ـ ب ـ ٥) رسم تخطيطي لمجال مغناطيسي ذي تماثل ثلاثي ويكون المجال اقوى في المنطقة المخططة: حيث تكون مدارات الايونات هنا منحنية بشدة اكثر، وهي لذلك تأخذ شكلا مثلثياً الى حد ما.
(باذن من قسم السيكلوترونات في شركة فيليبس).

طاقات أعلى، فانه يكون من المطلوب تزويد أي عدد كتلي بأعلى شحنة ممكنة طبقاً للمعادلة (٦). وفي السيكلوترونات العادية ذات القطب المصمت تتحدد «ش» بما يمكن أن يتحقق من مصدر الأيونات الداخلي، وحتى بالرغم من أن الأسلوب الفني لانتاج مصادر أيونات كفية قد حققت تقدماً عظيماً أثناء العقد الأخير، إلا أن قيمة الشحنة ما زالت عامل قيد شديد بالنسبة الى طاقة الأيون المتحصل عليها. ولكي يمكن التغلب على هذه الصعوبة يستخدم حاقن أيونات أو معجل أمامي (pre - accelerator) خارج السيكلوترون المتزامن ليحقن الأيونات التي تم تعجيلها الى طاقة منخفضة نسبياً، وسحبت، ثم سمح لها أن تمر داخل مُجرِّد (الأيونات) حيث يحدث التأين الى حالة أعلى للشحنة بسبب



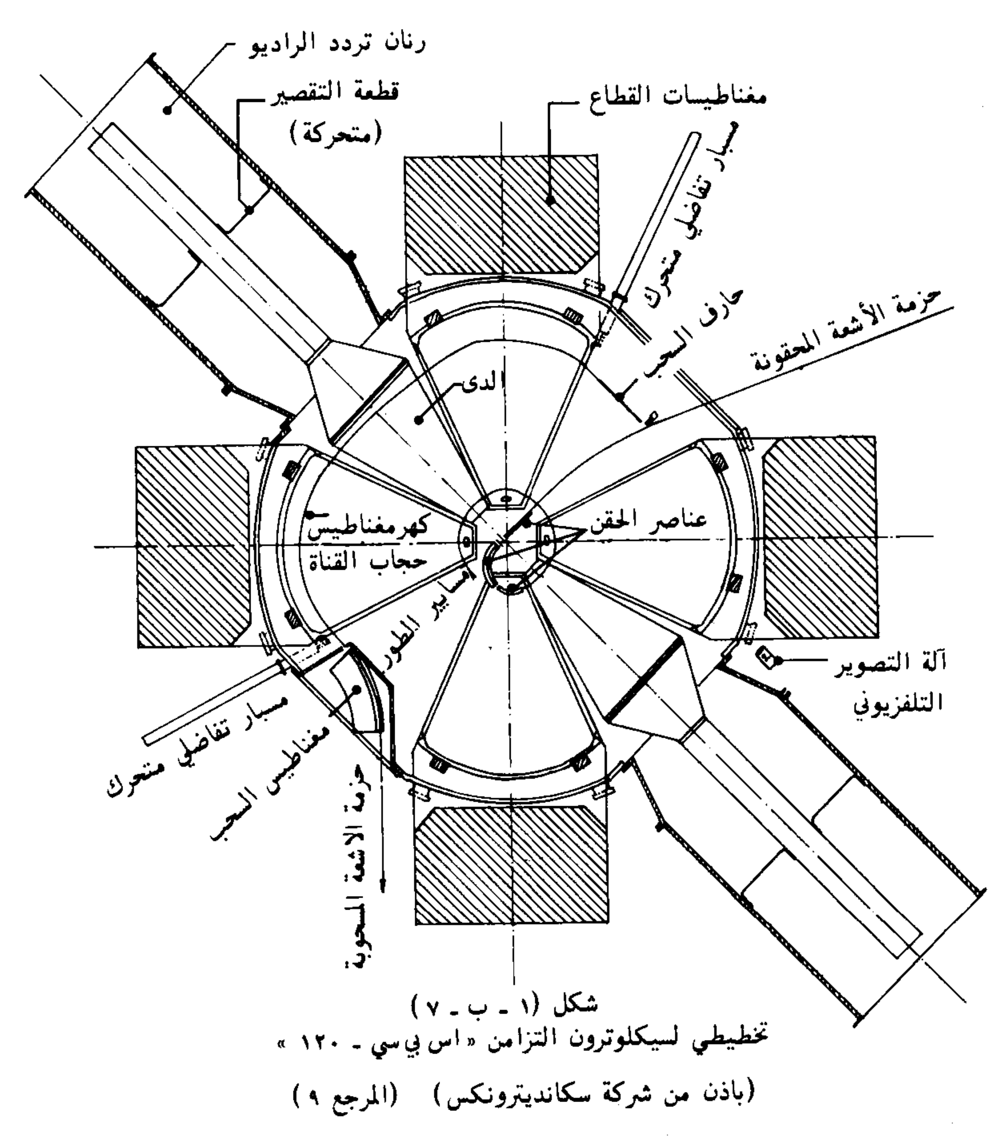
شكل (١ ـ ب ـ ٦) رسم تخطيطي لمجال متغير سمتّياً ذي تماثل ثلاثي، وقطاعات محددة بلوالب.
(باذن من قسم السيكلوترونات في شركة فيليبس).

تفاعلها مع مادة التجريد. وبهذه الطريقة يمكن أن تصل أيونات الأرجون الثنائية الشحنة مثلاً الى حالة شحنة قيمتها ١٠ بكثافات تقدر بحوالي ٣٠٪ من تلك التي كانت عليها قبل التجريد.

لقد تم تصميم سيكلوترونات متزامنة تستخدم الحقن الخارجي بواسطة « سكانديترونكس » بأربعة قطاعات زودت المعجل بما يمنح مدى واسعاً لتغيير الطاقة (١٠ الى ١٠٠٪) وتشكيلة كبيرة من الأيونات الثقيلة التي تتميز بنوعيات جيدة لحزمة الأيونات وبدورة شغل متغيرة بالاتحاد مع درجة تحليل عالية للمغناطيس المحلل، ويُرى في شكل ١ ب ٧ تخطيط لسيكلوترون سكانديترونكس ذي القطب ـ المشطور، كما يعطي الجدول التالي عينات لمعلومات عن بعض الأيونات الشائعة التي يمكن الحصول عليها من مثل هذه المعجلات [٩].

عينات المعلومات لبعض الأيونات الشائعة

الجسيم	طا$_{حقن}$ (م إف)	طا$_{سحب}$ (م إف)	مـج$_{حقن}$ (كيلوجاوس)	د (ميجاهيرتز)	العدد التوافقي	تباعد الدوران (مليمتر) حقن	تباعد الدوران (مليمتر) سحب
بروتون	٣	٥٥	٩ر٩٤	٨ر٦٤	٢	١٣ر٤	٣
ديوترون	٣ر٦	٦٤	١٥ر٤	٦ر٦٦	٣	١٥ر٦	٢ر٧
٣هـ$^{+٢}$	٩ر٦	١٧٨	١٥ر٤	٨ر٩٤	٢	٨ر٨	١ر٨
٤هـ$^{+٢}$	٧ر٢	١٢٩	١٥ر٣	٦ر٧٢	٢	١١ر٧	٢ر٧
١٢ك$^{+٤}$	٩ر٦	١٦٧	١٥ر٣	٤ر٤٨	٤	٢٨ر٧	٦ر٨
١٦أ$^{+٥}$	١١ر٣	١٩٥	١٥ر٣	٤ر٢٠	٤	٣٠ر٨	٧ر٣
٢٠نى$^{+٧}$	١٧ر٦	٣٠٧	١٥ر٣	٤ر٧١	٤	٢٧ر٨	٦ر٤
٤٠حو$^{+٩}$	١٤ر٦	٢٥٠	١٥ر٣	٣ر٠٣	٥	٤٥ر٧	١١ر٢



شكل (١ - ب - ٧)
تخطيطي لسيكلوترون التزامن « اس بي سي - ١٢٠ »
(باذن من شركة سكانديترونكس) (المرجع ٩)

وقد قامت شركات مختلفة ومختبرات البحوث بتصنيع سيكلوترونات التزامن بتصميات مختلفة، فأمكن الحصول على طاقات بمئات الملايين من القلط الالكتروني بغير تحديد فيما عدا التكلفة. وكان التطوير الحديث الآخر استخدام المغناطيسات المفرطة الموصِّلية لسيكلوترونات التزامن حيث أن

الفكرة المهمة هنا أن تُضمَ تقنية المجال المرتفع التي طورت للملفات المفرطة الموصِّلية لغرف الفقاعات (bubble chambres) مع التقنية المتواجدة لسيكلوترونات التزامن.

ان النتيجة الواضحة لاستخدام المجال المرتفع المتولد بواسطة هذه الملفات هي انخفاض في الحجم الطبيعي. وكمثل على ذلك نرى أن متوسط المجالات الرئيسية التي تزيد عن ٤٠ كيلوجاوس تكون أكثر من ضعف تلك التي يُتَحصل عليها في السيكلوترونات التقليدية عند « درجة حرارة الحجرة » بحيث يكون السيكلوترون المفرط المَوصِّلية حوالي نصف الحجم لنفس الطاقة، مما ينبىء بتوفير في كل من الانشاء وتكاليف التشغيل.

١ ب ٣ السينكروسيكلوترون

لقد رأينا في السيكلوترون أن الذي يحد من زيادة الطاقة هو الارتفاع النسبي في كتلة الجسيمات المعجلة مما يتسبب في خروجها عن طور (get out of phase) فلطية التعجيل المترددة الموضوعة خلال أقطاب السيكلوترون (الديز). على أن الزيادة الغير محددة في الطاقة قد جُعلت ممكنة بالمبدأ الجديد الذي اكتشف في عام ١٩٤٤ بواسطة عالمين في دولتين مختلفتين، وقد حدث ذلك في نفس الوقت تقريباً وباستقلال كل منهما عن الآخر: فيكسلار في الاتحاد السوفييتي وماكميلان في أمريكا. وطبقاً لمبدئهما من استقرار الطور (phase stability)، فان الجسيمات التي لها أخطاء طفيفة في الطور أو الطاقة تستمر في التعجيل مع وجود ذبذبات ثانوية غير هامة في الطاقة والطور حول القيمة الصحيحة للطاقة ولطور التوازن. وينطبق هذا المبدأ على ثلاثة أنواع للمعجلات: المعجل الخطي، والسينكروترون والسينكروسيكلوترون.

وبناء على ذلك فانه يمكن في السينكروسيكلوترون أن نزيل حد الطاقة الأقصى بما يمكن من تعجيل الأيونات على نحو غير محدد لو أن التردد المستخدم

يتغير ليطابق بالضبط تردد دوران الأيون . فاذا ما تغير التردد دورياً فإن تجميعاً قصيراً للأيونات سيعجل الى طاقة أعلى في كل اندفاعة للتردد بما ينتج عنه تعاقب لهذه الانفجارات التي تحدث عند تردد التعديل . وهكذا تنخفض دورة الشغل الفعالة بشدة لتؤدي الى قيمة متوسطة للأيونات الخارجة أقل بكثير (حوالي ١٪) من التيار الخارج في السيكلوترون التقليدي . لعل هذا هو ثمن تجنب الحد من الرنين من أجل تردد ثابت ، ولقد صممت السينكروسيكلوترونات بطاقات للبروتونات تغطي مدىً واسعاً (المرجع رقم ٧ ، ص ٣٥٤) من ١٠٠ م إف (جامعة ماك جيل) الى ٧٥٠ م إف (جامعة كاليفورنيا) .

ويجدر بالذكر انه لانتاج مجال **مغناطيسي** مستقر يتم «استثارة» الكهرمغناطيس ذي القلب المصمت بواسطة تيار مستمر . ولكل قيمة مجال مغناطيسي متطابقة لطاقة ما للجسيم يوجد مدار متوازن خاص لنصف القطر مثلما تعطيه العلاقة النسبية الآتية (بالوحدات العملية ك كج ث) :

$$\text{نق} = \frac{\left(\text{طا}_{\text{ح}}\left(\text{طا}_{\text{ح}} + ٢\,\text{طا}_{\text{صفر}}\right)\right)^{١/٢}}{\text{ع}_{\text{ض}}\ \text{ش}_{\text{أ}}\ \text{مج}_{\text{م}}} = \frac{\left(\text{طا}_{\text{ح}}\left(\text{طا}_{\text{ح}} + ٢\,\text{طا}_{\text{صفر}}\right)\right)^{١/٢}}{٣٠٠\ \text{مج}_{\text{م}}}\ \text{متر} \quad (٧)$$

وينطبق الثابت العددي عندما تكون طاقة الحركة $\text{طا}_{\text{ح}}$ وطاقة السكون $\text{طا}_{\text{صفر}}$ معطاة بوحدة الـ م إف والمجال المغناطيسي $\text{مج}_{\text{م}}$ بوحدة ويبر/ $\text{م}^{٢}$. كما أن تردد دوران الأيون يكون :

$$\text{د}_{\text{أ}} = \frac{\text{ع}_{\text{ض}}^{٢}\ \text{ش}_{\text{أ}}\ \text{مج}_{\text{م}}}{٢\,\text{ط}\left(\text{طا}_{\text{صفر}} + \text{طا}_{\text{ح}}\right)} = ١٤٣٢٠\ \frac{\text{مج}_{\text{م}}}{\text{طا}_{\text{صفر}} + \text{طا}_{\text{ح}}}\ \text{ميجاسيكل} \quad (٨)$$

وتوضح المعادلة (٨) أن النقص في تردد الدوران يرجع بصفة أولية الى تزايد الطاقة الحركية للأيونات . الا انه يتأثر كذلك بالنقص البسيط في المجال

المغناطيسي عندما يكبر نصف القطر المطلوب لاستقرارية المدار. وطالما كان الأمر يتعلق ببناء الماكينة (أي المعجل) فان السينكروسيكلوترون يكون شديد الشبه بالسيكلوترون فيما عدا لو تعرضنا لبعض الانجازات التقنية التي تتمثل في امكانية الذهاب الى طاقات أعظم ارتفاعاً والزيادة في حجم المغناطيس التي تستتبع ذلك. هذا، ويعتبر المغناطيس المصمت القلب والذي يكون وجه قطبه ذا مساحة كبيرة أضخم مكونات السينكروسيكلوترون وأعظمها تكلفة، فينبغي أن يكون المجال المغناطيسي ثابتاً ومتناسقاً بالتقريب على وجه القطب، وأن يتناقص قليلاً مع زيادة نصف القطر حتى يتسنى تزويد قوى التركيز. لذلك تكاد تكون الأقطاب متوازية بمحيط مناسب مزود على أوجه الأقطاب حتى تغطي هبوطاً قطرياً بقيمة قلة من أجزاء في المائة من مركز القطب الى حافته.

الحد من الطاقة:

لا يوجد تحديد للطاقة الممكن الحصول عليها من السينكروسيكلوترون من الناحية النظرية شريطة أن يُصعَّد حجمه وأقطاب «الديز» والمغناطيس الى نصف القطر المطلوب للحزمة الأيونية. ويذكر هنا أن وزن المغناطيس وتكلفة الحديد تزيد تقريباً مع مكعب قطر القطب. وعند الطاقات الغير نسبية تتغير طاقة الجسيم مع مربع نصف قطر المدار، وعليه يكون وزن المغناطيس للسيكلوترونات الصغيرة مقدراً على وجه التقريب بالطاقة مرفوعة لأس $\frac{٣}{٢}$، أي أن الوزن يتناسب مع $طا_{ح}^{\frac{٣}{٢}}$. غير أنه في حالة الطاقات العالية تكون طاقة الجسيم متناسبة تقريباً مع نصف قطر المدار، وعليه يكون وزن المغناطيس متناسباً مع $طا_{ح}^{٣}$. وتعتبر هذه الزيادة السريعة في الوزن والتكلفة التحديد الرئيسي للطاقة القصوى من الناحية العملية للسينكروسيكلوترونات. ولعل المشاكل الوحيدة المتعلقة ببناء السينكروسيكلوترون فيما فوق ٧٥٠ م إف ما

هي الا مشاكل تكلفة لا مبرر لها تعود الى الوزن الزائد للمغناطيس المصمت القلب ، والحل الوحيد لمشكلة الطاقات الأعلى تكمن في المعجلات التي تستخدم مغناطيسات حلقية الشكل ونصف قطر ثابت المدار ؛ هذا هو السينكروترون الذي يُبنى مرة أخرى على مبدأ استقرارية الطور .

المراجع

١ - Lawrence, E.O. and Eldlefsem, N.E., Science, 72: 376 (1930).

٢ - Wideroe, R., Arch. Elektrotech, 21: 387 (1928)

٣ - Lawrence, E.O. and Livingston, M.S., Phys. Rev., 37: 1707 (1931) 38: 136 (1931), 40: 19 (1932).

٤ - Livingston, M.S., Lawrence, E.O., Phys. Rev. 45: 608 (1934).

٥ - Lawrence, E.O. (and others), Phys. Rev., 56: 124 (1939).

٦ - Rose, M.E. Phys. Rev., 53: 392 (1938), Wilson R.R., Phys. Rev 53: 408 (1938), and Cohen, B.L. Rev. Sci. Instr. 24: 589 (1953).

٧ - Livingston., M.S., Blewett, J.P., «Particle Accelerators», McGraw - Hill Book Company, 1962, pp 149.

٨ - Thomas, Phys. Rev., 54: 580 (138).

٩ - «A Proposal from Scanditronix, Sweeden, for an Ion Split-Pole Cyclotron Accelerator», Private Communication, 1976.

١ ب ٤ سينكروترون البروتونات

مقدمة :

لقد رأينا كيف تتحدد زيادة الطاقة الى ما بعد حد معين لسبب أو لآخر في مختلف المعجلات : ففي المولدات **الالكتروستاتية** كان التحديد يرجع الى انهيار العزل عند المجالات الكهربية العالية ، وفي السيكلوترون كانت الزيادة النسبية في الكتلة هي التي دمرت صحة سريان مبدأ الرنين عند الطاقات العالية . وكما سنرى في البيتاترون ، يكون التحديد بسبب فاقد الاشعاع بالرغم من أنه يعمل في مدى المائة م إف . أما السينكروسيكلوترون ، فمع أنه لا يوجد تحديد نظري للطاقة ، فان التكلفة هي التي وضعت عامل تحديد خطير عند طاقات في مدى البليون فلط الكتروني . ومن ناحية أخرى فان التحديد المفروض على المعجلات الخطية هو متاعب طولها الغير عملي فضلا عن تحديد التكلفة في مدى البليون فلط الكتروني . ولا تستطيع أيٌّ من هذه الماكينات الاحتفاظ بالتعجيل الى طاقات عالية بدون تحديد . وكما ذكرنا في الجزء السابق ، فان الزيادة الغير محددة للطاقة كانت ممكنة باكتشاف مبدأ استقرارية الطّور الذي جعل من الممكن تقديم سينكروترون البروتونات على اعتبار أنه أوج ذروة معجلات « الطور المستقر » والذي يمنح أعلى طاقة تحققت بعد . انها تمثل قمة التطور في فن المعجلات فيما يتعلق بمثل تلك الأساليب الفنية المعقدة في جميع فروع الهندسة ، متضمنة موهبة الفيزيائيين والنظريين لتأكيد مثل هذا التوافق السليم والدقة العالية لتشغيل العديد من الأنظمة المعقدة التي تجعل المحطم الذري (السينكروترون) يعمل كوحدة واحدة .

ولقد بنيت عدة سينكروترونات للبروتونات في مدى طاقة فوق واحد ب إف وهي فعلاً في حالة تشغيل ، لدرجة أن مبادىء تشغيلها مفهومة الآن جيداً . وفي الجدول رقم (١) نعطي قائمة بالماكينات الحالية ذات طاقات أكثر من واحد ب إف مع بعض متغيراتها .

جدول (١)

اسم السينكروترون	الطاقة القصوى (ب إف)	موقع السينكروترون	كثافة حزمة الأيونات	متوسط نصف قطر المدار (م)	المجال المغناطيسي الأقصى (كيلو جاوس)
كوزموترون	٣	بروك هافن (أمريكا)	$١٠^{١١}$ جسيم/ النبضة	١٠ر٧	١٣ر٨
ساتيرن	٢ر٥	ساكلاي (فرنسا)	$١٠^{١١}$ جسيم/ النبضة	١١	١٥
سينكروترون برمنجهام	١	برمنجهام (انجلترا)	—	٤ر٥	١٢ر٦
بيفاترون	٦ر٤	جامعة كاليفورنيا (أمريكا)	$١٠^{١٤}$ جسيم/ النبضة ١٠ نبضات/ دقيقة	١٨ر٢	١٦
سينكروفازوترون	١٠	دبنا (روسيا)	$١٠^{٩}$ جسيم/ النبضة ٥ نبضات/ دقيقة	٣٠ر٥	١٣
«بي بي إي» (P.P.A.)	٣	برينستون (أمريكا)	—	١٢ر٢	١٣ر٨
نيمرود	٧	هارويل (انجلترا)	—	٢٣ر٦	١٤
سينكروترون كانبيرا	١٠ر٦	كانبيرا (استراليا)	—	٦ر٤	٨٠
سي . بي . إس (C.P.S.)	٢٨	سيرن (سويسرا)	$١٠^{١١}$/ النبضة ١٠ نبضات/دقيقة	-	-

تابع الجدول (١)

اسم السينكروترون	الطاقة القصوى (ب إف)	موقع السينكروترون	كثافة حزمة الأيونات	متوسط نصف قطر المدار (م)	المجال المغناطيسي الأقصى (كيلوجاوس)
إي . جي . إس (A.G.S.)	٣٠	بروك هافن (أمريكا)	أكثر من $١٠^{١٠}$ جسيم ٢٠ نبضة/ دقيقة	١٢٨	١٥
زي . جي . إس (Z.G.S.)	١٣	أرجون (أمريكا)	$١٠^{١٣}$ جسيم/نبضة ١٥ نبضة/ دقيقة	٣٠ —	٢٢ —
إس . بي . إس (S.P.S.)	٤٠٠	سيرن (سويسرا)	$١٠^{١٣}$ جسيم/ نبضة	١١٠٠	—
إف . إن . إي . إل F.N.A.L	٥٠٠	معمل فيرمي (أمريكا)	٢×١٠^{١٣} جسيم/نبضة	١٠٠٠	—

نظرية السينكروترون باختصار:

يستخدم المرء عادة في المعالجة التحليلية للسينكروترون بعض التعبيرات التي تتعامل مع التركيز المغناطيسي واستقرارية الجسيم. وسنبدأ بتقديم تلك التعبيرات ونصف الدور الذي تلعبه في ظواهر مثل تركيز واستقرارية الجسيمات التي تحدث بسبب ذبذبات الطور وقيمة الذروة. على أن التحليل النظري سيكون مختصراً للغاية وسنستخدم في أغلب الأحيان وصفاً نوعياً، حيث أن التفصيلات النظرية يمكن الرجوع اليها في المادة المطبوعة (الدوريات العلمية وبحوث المؤتمرات وغيرها)، بينما سنتقيد هنا بمختصر موجز للنظرية حيث المشاكل عديدة والتعقيدات النظرية بعيدة عما يقتضيه المفهوم من هذه الدراسة.

مؤشر المجال المغناطيسي «ن» (magnetic field index): نظراً لأنه في حالة المغناطيسات ذات أقطاب بأوجه متوازية تهبط قيمة المجال المغناطيسي دائماً مع زيادة نصف القطر (نق)، يكون التعبير عنه كما يلي:

$$\text{مج} = \frac{\text{و}}{\text{نق}^{\text{ن}}} \qquad (١)$$

حيث و = ثابت، ن تكون بدلالة نق بطريقة يتم تعيينها تجريبياً نقطة بنقطة، وهي تُعرف بمؤشر المجال المغناطيسي، وتعطي عادة وصفاً لقيمة المجال في المستوى المتوسط لفجوة المغناطيس. لذلك فان المجال المتناسق يمكن وصفه بوضع ن = صفر. وعليه فاننا عندما نناقش استقرارية المدار سينصب اهتمامنا على المجال المغناطيسي المتاخم مباشرة للمدار المستقر. ومن هذه الناحية يسهل توضيح أن

$$\text{ن} = \frac{\text{نق}}{\text{مج}} \cdot \frac{\text{د مج}}{\text{د نق}} \qquad (٢)$$

بما يعطي ن عند أي نصف قطر نق بدلالة المجال ومعدل تغييره مع نصف القطر ($\frac{\text{د مج}}{\text{د نق}}$) عند تلك النقطة.

ذبذبات قيمة ذروة الجسيمات (Amplitude Oscillations)

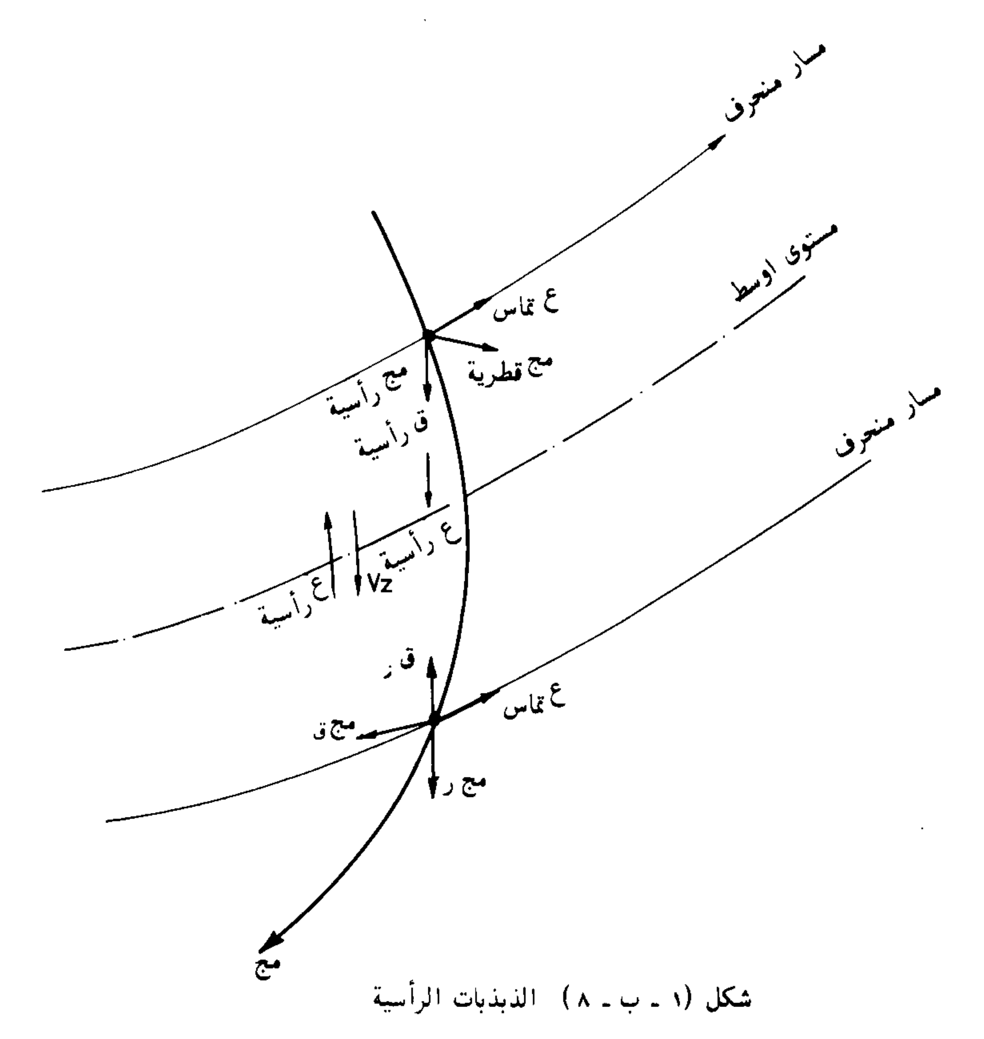
أ ـ الذبذبات المحورية (الرأسية):

ان انحنـــاء خطوط القوى المغنـــاطيسيـــة حول المستوى المتوسط (تكون محسوسة أكثر بالقرب من محيط الأقطاب) ينتج مركبة قطرية للمجال مج$_{ق}$ تزيد عند نصف قطر ثابت مع المسافة من المستوى المتوسط. والآن يكون حدوث الذبذبات للجسيمات والتي تقيدها على المدار المستقر لتنتج تركيز الجسيمات كنتيجة لتداخلات الجسيم مع مركبات المجال المغناطيسي كما يُرى في شكل ١ ب ٨. فبالنسبة للأيون الذي يرحل خارج المستوى المتوسط يؤدي تداخل مج$_{ق}$ مع سرعة التماس للأيون ع$_{تماس}$ الى توليد قوة ق$_{رأسية}$ متجهة دائماً نحو المستوى المتوسط بحيث تحدث الذبذبات المحورية (الرأسية). وهكذا فان مركبة السرعة الرأسية الناتجة ع$_{رأسية}$ تتداخل مع مج$_{ق}$ لتنتج قوة تماسية ق$_{تماس}$ لدرجة أن ع$_{تماس}$ تخضع كذلك لتغيرات دورية. ويلاحظ أن القوة الرأسية ق$_{رأسية}$ تغير اتجاهها عندما يعبر الجسيم المستوى ص = صفر (الاوسط) فقط، أي مرتين لكل دورة. ومن ناحية أخرى تعكس ق$_{تماس}$ اتجاهها مع التغيير في اتجاه الحركة المحورية فضلاً عن عبورات المستوى ص = صفر، أو أربع مرات لكل دورة محورية. وعليه فان تردد الذبذبات التماسية د$_{تماس}$ = ضعف تردد الذبذبات المحورية، د$_{رأسية}$. واذا ما اعتبرنا معادلة الحركة المحورية (ص) لجسيم يرحل فوق أو تحت المستوى الأوسط يكون من السهل أن نرى أن

$$ص + ن\,\omega^{2}\,ص = صفر \qquad (٣)$$

حيث ω = تردد دوران الجسيم. وتصف المعادلة (٣) حركة توافقية بسيطة طالما كانت ن موجبة، بما يعني أنه سيكون لدينا استقرار محوري ما دامت خطوط المجال المغناطيسي تنبعج للخارج. وتعمل قوة الارجاع نω^{2}ص كما لو كانت زنبركا. ونرى أن تردد الذبذبات المحورية يُعطى بالقيمة.

$$\omega_{ص} = \omega\sqrt{ن} \qquad (٤)$$

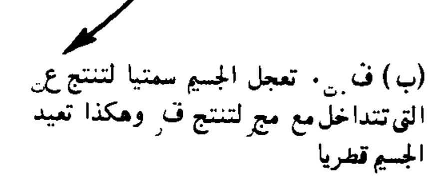


شكل (١ ـ ب ـ ٨) الذبذبات الرأسية

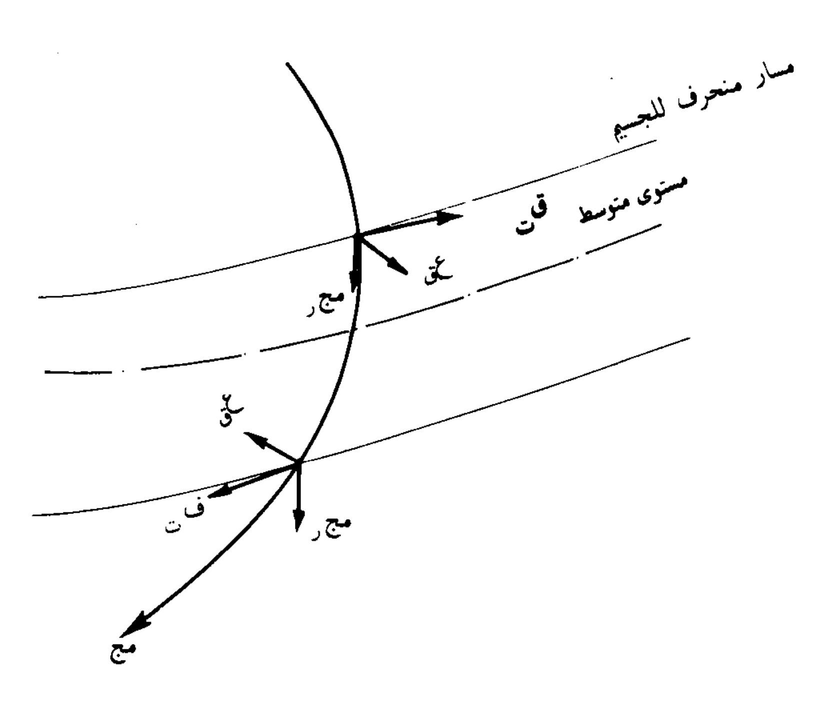
ب ـ الذبذبات القطرية

ان الذبذبات القطرية ، مثل الذبذبات المحورية ، تمثل طاقة حركية تظهر وتختفي بالتناوب . وكما في الحالة المحورية ، تصبح الطاقة مخزونة في الذبذبات التماسية المركبة على حركة التماس الأساسية . هذا وتتداخل السرعة الخارجية القطرية عق مع المركبة الرأسية للمجال مجرأس لتنتج قوة التماس قتماس التي





(ب) فت . تعجل الجسيم سمتيا لتنتج عت
التى تتداخل مع مجر لتنتج قر وهكذا تعيد
الجسيم قطريا



(أ) تتداخل عق مع مجر
لتنتج فت

شكل (١ - ب - ٩)

تعمل على تعجيل الأيون الدوار (شكل ١ ب ٩)؛ وهذه الزيادة الصغيرة في السرعة تنتج قوة متجهة للداخل والتي تعكس اتجاه الحركة القطرية في النهاية. وبالحصول على قيمة للعجلة القطرية

$$عج_{ق} = نق - \frac{ع^{٢}}{نق}$$

يمكن الحصول على معادلة الحركة بضرب هذه العجلة بالكتلة، ثم مساواة هذا بالقوة الناتجة عن تداخل $ع_{تماس}$ مع $مج_{رأسية}$. وتبعاً لذلك، اذا كان التغير في نصف قطر الجسيم س، فمن السهل توضيح أن:

$$\ddot{س} + \omega^{٢} (١ - ن) س = صفر \qquad (٥)$$

وهي الأخرى حركة توافقية بسيطة للأيون مقاسة بالنسبة الى مدار التوازن شريطة أن تكون ن أقل من واحد. وفي الحقيقة فان قوة الاعادة تكون أقوى لو أن «ن» كانت سالبة (لتمثل مجالاً مغناطيسياً يتزايد مع نصف القطر بحيث يكون انبعاج الخطوط متجهاً للداخل). ولكن، كما رأينا من قبل، تؤدي القيم السلبية لـ «ن» الى قوى مفرقة في الاتجاه المحوري.

هذا ويكون تردد الحركة القطرية الذي نحصل عليه من المعادلة (٥) كالآتي:

$$\omega_{س} = \sqrt{١ - ن}\,\omega \qquad (٦)$$

وهو لذلك أقل من ω اذا كانت ن أقل من واحد.

القيم الابتدائية لذروة الذبذبات المحورية والقطرية

في حالة الحركة التوافقية البسيطة المحورية يكون لدينا

$$ص = ص_{صفر} جا \sqrt{ن}\,\omega\, ز$$

لذلك فان: $\dot{ص} = ص \sqrt{ن}\,\omega$ جتا $\sqrt{ن}\,\omega\, ز$، بحيث أن قمة السرعة

(peak) تكون $ض = ص_{صفر}\sqrt{ن}\,\omega$ ، ويمكن حساب الطاقة في الشكل المحوري عند اللحظة التي تكون فيها الطاقة كلها حركية :

$$ط_{ص_{صفر}} = ١/٢\ ك\ ض_{صفر}^{٢} = ١/٢\ ك\ ص_{صفر}^{٢}\ ن\ \omega^{٢}$$

وتكون قيمة ذروة الذبذبات المحورية هي :

$$ص_{صفر} = \left(\frac{٢\ ط_{ص\ صفر}}{ك}\right)^{١/٢} \frac{١}{\omega\sqrt{ن}} = \left(\frac{٢\ ط_{ص\ صفر}}{ك}\right)^{١/٢} \frac{١}{\omega_{ص}} \quad (٧)$$

وبالمثل للشكل القطري :

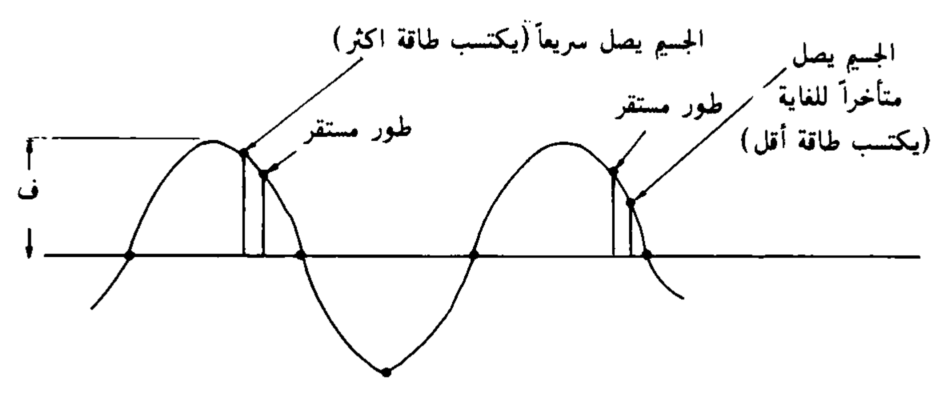
$$س_{صفر} = \sqrt{\frac{٢\ ط_{س\ صفر}}{ك}} \cdot \frac{١}{\omega\sqrt{١ - ن}} = \sqrt{\frac{٢\ ط_{س\ صفر}}{ك}} \cdot \frac{١}{\omega_{س}} \quad (٨)$$

لذلك فانه لنفس الطاقة في كل شكل ، المحوري والقطري ، تتغير قيمة ذروة الذبذبات عكسياً مع تردد الشكل الموافق لها .

وفي حالة ما اذا كان حقن الأيونات في السينكروترون يحدث عند طاقة معطاة ، مع وجود خطأ معروف في زاوية الحقن ، يمكن ايجاد الطاقة في الاتجاه المستعرض (القطري أو المحوري) واستخدامها في المعادلات السابقة لايجاد الازاحات القصوى الابتدائية .

ذبذبات الطّوْر (**Phase Oscillations**) :

يُحتفظ بالجسيمات في السينكروترون في مدارات دائرية بصفة عامة بواسطة المجال المغناطيسي ، وكلما ازدادت طاقة الجسيم يزيد المجال المغناطيسي بالمعدل الذي يجعل نصف قطر مدار الجسيم يبقى ثابتاً ، في الوقت الذي يحدث فيه التعجيل عند فجوة أو أكثر حول المدار . هذا ، وكلما زادت سرعة الجسيم يجب زيادة تردد المجال للاحتفاظ بثبات « زحزحة الطور » (phase shift) كلما مرّ الجسيم من فجوة الى فجوة . وهنا يكون طور التوازن على الجانب المتناقص من



شكل (١ ـ ب ـ ١٠) ذبذبات الطّور

موجة المجال، شكل ١ ب ١٠ . ويلاحظ أن الجسيات التي تصل سريعاً جداً تكتسب طاقة كبيرة للغاية وتنطلق على المدارات ذات نصف القطر الأكبر (ك ع = مج ش؛ نق)، وبالتالي ذات المحيط الأعظم؛ فهي تأخذ وقتاً أطول لتصل عند الفجوة التالية وهكذا يكون وصولها أقرب لطور التوازن. ومن ناحية أخرى، تكتسب الجسيات التي تصل متأخرة جداً طاقة قليلة للغاية فتأخذ نصف قطر مدار أصغر وتنجز عبوراً سريعاً جداً؛ فهي تصل، مثلما سبق، الى نقطة أقرب لطور التوازن.

ولو أن زاوية الطور قيست من نقطة صفر الفلطية فيمكن أن يُرى أن قيمة زاوية طور التزامن[١] لذروة فلطية معطاة «ف» هي:

$$\Psi_{\text{تزامن}} = \frac{\text{٢ ط نق}^{٢}\,\text{مج}_{\text{صفر}}}{\text{ف}} \qquad (٩)$$

حيث $\text{مج}_{\text{صفر}}$ هي المعدل الزمني لتغير المجال المغناطيسي. ونلاحظ أنه ليس من الضروري أن تبقى $\Psi_{\text{تزامن}}$ ثابتة خلال دورة التعجيل كلها. والمتصور هنا أن زاوية طور التوازن ترتفع فقط عندما يوجد معدل مطلوب لزيادة طاقة الأيون حيث «يُبَرمج» مقدماً التغير في تردد المذبذب مضافاً اليه المجال المغناطيسي.

العلاقة بين تغيير كمية التحرك وزمن الدوران :

اذا تواجد تغيير Δ ز في الزمن ز اللازم لعمل دورة وذلك كنتيجة لخطأ في نصف القطر ، وتبعاً لذلك سيكون هناك تغيير Δ ح في كمية الحركة « ح » للجسيم ، وعليه يمكن الحصول على المعادلة

$$\frac{\Delta \text{ز}}{\text{ز}} = \left[\frac{1}{1 - \text{ن}} - \left(\frac{\text{ك}_{\text{صفر}} \; \text{ع}^{2}_{\text{ض}}}{\text{ك} \; \text{ع}^{2}_{\text{ض}}} \right)^{2} \right] \frac{\Delta \text{ح}}{\text{ح}} \qquad (١٠)$$

بحيث تكون اشارة الخطأ الجزئي في ز هي نفسها مثل اشارة الخطأ الجزئي في ح . ويعني هذا أن الزيادة في كمية حركة الجسيم يسبب زيادة في زمن دورانها .

مبدأ عمل السينكروترون :

يتكون سينكروترون البروتونات من ثلاث أجزاء أساسية : ١) حاقن له القدرة على إنتاج حزمة من أشعة البروتونات جيدة التركيز ، ٢) مغناطيس حلقي يمكن تنبيض مجاله المغناطيسي من صفر الى عدة آلاف الجاوس في زمن قصير ، و٣) فجوة رنانة (resonant cavity) تستطيع انتاج فلطية تردد الراديو ، على أن يُحتفظ بالتردد في تزامن مع تردد دوران الجسيم في المغناطيس .

ويكون تسلسل التشغيل كما يلي : تُزود القدرة الى المغناطيس حتى يبدأ المجال المغناطيسي في الارتفاع ، تحقن البروتونات حالما يكون المجال المغناطيسي قد توصل الى قيمة تستطيع عندها البروتونات لتوها أن تدور حول الماكينة . ويكون تقدير ذلك بقيمة نصف قطر السينكروترون حيث أن طاقة حزمة البروتونات عند نقطة الحقن تكون ك ع = $\text{مج}_{\text{حقن}}$. شأ . نق .

حيث : $\text{مج}_{\text{حقن}}$ = قيمة المجال المغناطيسي عند حقن حزمة البروتونات داخل حلقة السينكروترون ذات نصف قطر « نق » .

والآن، كلما استمر المجال المغناطيسي في الارتفاع، انكمش نصف قطر مدار البروتونات (مرة أخرى من المعادلة $ك ع = مج\ ش_أ\ نق$)، ولكن يتم معادلة ذلك برفع طاقاتها كل مرة تمر خلال الفجوة الرنانة بتزويد فلطية التعجيل. وبالضبط الصحيح لفلطية وتردد هذه الفجوة يمكن الاحتفاظ بوضع مسار الجسيمات ثابتاً كلما ارتفع المجال المغناطيسي والطاقة. وبهذه الطريقة يمكن الاحتفاظ بطاقة البروتونات في تدرج مع المجال المغناطيسي الى أن يصل هذا المجال الى قيمته القصوى. وعند ذلك الوقت يمكن سحب البروتونات ذات الطاقة من الماكينة لاستخدامها كحزمة أشعة البروتونات ذات الطاقة العالية، أو أنها يمكن أن توجه على هدف في داخل السينكروترون حتى يمكن استخدام الجسيمات الثانوية من هذه الأهداف.

هذا هو مبدأ تشغيل السينكروترونات بصفة عامة، مع أنه يوجد اختلافات عديدة ممكنة في اطار هذا المبدأ العام حيث يكون الخلاف الرئيسي بين السينكروترونات في الطريقة التي تُركّز بها حزمة الأشعة الدوارة حتى نحتفظ بها في منطقة جيدة التعريف. على أن مثل هذا التقييد للحزمة في منطقتها انما يعود الى ذبذبات الجسيم رأسياً وقطرياً كما شرح سابقاً.

سينكروترونات التركيز الضعيف:

لنعتبر على سبيل المثال سينكروترون البروتونات في بيرمنجهام الذي يرى تصميمه تخطيطياً في شكل ١ ب ١١. ففي هذه الماكينة يتناقص المجال المغناطيسي مع نصف القطر الى أن يكون بأعلى قيمة في اتجاه المركز. وعليه فان $د\ مج$ تكون سالبة ويكون مؤشر المجال المغناطيسي ($ن = \frac{-نق}{مج} \cdot \frac{د\ مج}{د\ نق}$) موجباً. وتبعاً لذلك تتذبذب الجسيمات حول مدار التوازن (الذي يعتبر دائرة) بترددات $\omega_{ص}$ و $\omega_{س}$ المعطاة بالمعادلات ٤ و٦ على التوالي، حيث تكون قيمة ن في سينكروترون بيرمنجهام حوالي ٧ر٠. هذا، ويمكن أن يُرى أن قيمة لـ «ن» أكبر من واحد ستسبب بداية متاعب في الاتجاه القطري ($\omega_{س} = \sqrt{١ - ن}\ \omega$، وأقل

من صفر تسبب متاعب في الاتجاه الرأسي ($\omega_{ص} = \sqrt{ن}\,\omega$). على أن المرء يجب أن يتحاشى الأوضاع التي يكون فيها الترددان مرتبطين ببساطة ، اذ أن ذلك يمكن أن يسبب حالة رنانة يمكن فيها أن تنتقل طاقة حركة واحدة الى طاقة الحركة الأخرى . وهذا يمكن أن يؤدي الى ذبذبة ذات قيمة ذروة عالية في الاتجاه الرأسي مما يؤدي الى فقد البروتونات عندما تصدم حوائط غرفة التفريغ .

ان تصميم الماكينة الخاص هذا (شكل ١ ب ١١) ليس هو الأكثر ملائمة وذلك من وجهة نظر بناء السينكروترون ولا من حيث استخدامه . فمن الممكن جعلها أكثر ملائمة ببنائها في أجزاء بما يسمح بمسافات خالية من المجال بين الأجزاء بالرغم من أنها لا زالت تحتفظ بخاصية أن المجال المغناطيسي يتناقص مع نصف القطر داخل الجزء المغناطيسي . وهذا يسمح بتوصيل نظام الضخ لتفريغ الهواء من بين أقطاب المغناطيس وكذلك يسمح بسهولة سحب حزمة أشعة البروتونات أو الجسيمات الثانوية .

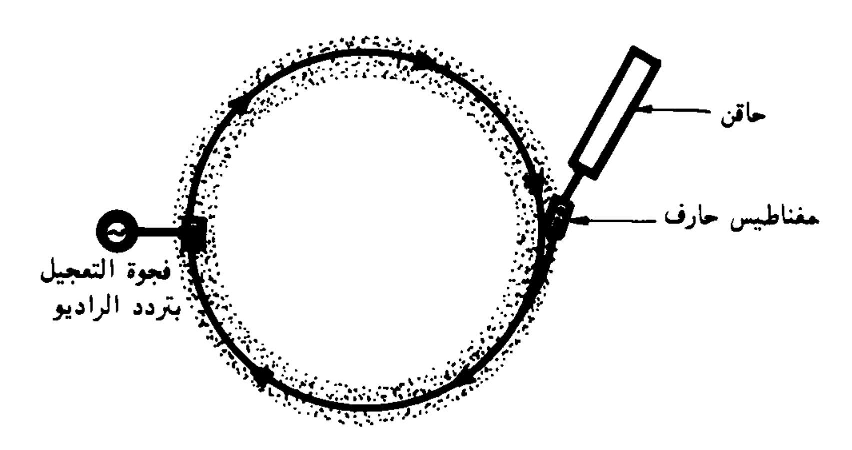
ومع ذلك فان اضافة هذه الأجزاء المستقيمة فيما يسمى بسينكروترون « حلبة السباق » (race track) يغير بعض الشيء ترددات الذبذبات القطرية والرأسية كما يتضح فيما يلي :

لنعتبر سينكروترون بأربعة أجزاء مستقيمة وأربع منحنيات بـ ٩٠° لكل منها . هنا تكون النسبة بين طول « حلبة السباق » والدائرة :

$$\frac{٢\ ط\ نق + ٤\ ل}{٢\ ط\ نق} = ١ + \frac{٤\ ل}{٢\ ط\ نق}$$

حيث ل = طول الجزء المستقيم ، ويكون تردد دوران « حلبة السباق » $\frac{١}{١ + \frac{٤\ ل}{٢\ ط\ نق}}$ مرات تردد السينكروترون الدائري بنفس نصف القطر نق .

وهذا يكون :



شكل (١ ـ ب ـ ١١) رسم تخطيطي لسينكروترون بيرمنجهام

$$\omega_{\text{ت س}} = \omega_{\text{دائري}} \cdot \frac{١}{١ + \frac{٤\ \text{ل}}{٢\ \text{ط}\ \text{نق}}} \qquad (١١)$$

وحتى برغم أن $\omega_{\text{ص}}$ ، $\omega_{\text{س}}$ تتغيران ، الا أن مبدأ التركيز الأساسي لا يتغير. أي أن قيمة ن المكافئة لا تزال تقع في المنطقة بين صفر وواحد. وعلى سبيل المثال ينقسم كل من « البيفاترون » « والكوزموترون » الى أربعة أجزاء من ربع الدائرة بفجوات كبيرة بين أرباع الدائرة.

يمكن تصنيف جميع هذه الماكينات على أنها ماكينات ضعيفة التركيز. على أن الضرر الرئيسي للتركيز الضعيف هو أن غرفة التفريغ ينبغي أن تُجعل كبيرة نسبياً ، وبالتالي يكون وزن المغناطيس وتكلفته أعظم ، كما سنشرح فيما بعد.

سينكروترونات التركيز القوي :

في هذه المعجلات تستخدم قيمة عالية جداً لـ « ن ». ويمكن أن يتم ذلك باستخدام مغناطيسات ذات قيم موجبة وسالبة بالتناوب لمؤشر المجال المغناطيسي ن التي تكون قيمتها داخل هذه الأجزاء عالية بما يصل الى ١٠٠ .

هذا ومن الممكن أن يُفهم من المعادلتين ٤ و٦ أن أجزاء المغناطيس ستزود التركيز إما في الاتجاه القطري أو الرأسي ـ ولكن ليس في كليهما ـ بحيث تقوم المغناطيسات المتتابعة بتجميع وتفريق البروتونات بالتناوب.

على أنه من المعروف، في علم البصريات أن تعاقباً للعدسات المجمعة والمفرقة يكون بمقدوره أن ينتج عدسة مجمعة نهائية. وبنفس الطريقة، فان هذه السينكروترونات المترددة الميل (س م م Alternating Gradient Synchrotron «AGS») المستخدمة لتعاقب من المغناطيسيات المجمعة والمفرقة تنتج تأثيراً مجمعاً نهائياً. ويمكن اختيار نظام المغناطيسات في مثل هذه المعجلات لتعطي أثراً مجمعا أقوى منها في معجلات التركيز الضعيف. ولما كانت « ن » عالية فان قيمة ذروة الذبذبات الرأسية التي تتناسب عكسياً مع $\sqrt{ن}$ (المعادلة ٧) والذبذبات القطرية التي تتناسب عكسياً مع $\sqrt{ن - ١}$ (المعادلة ٨) حول مدار التوازن يمكن أن تُجعل صغيرة، ومن ثم فان غرفة التفريغ يمكن كذلك أن تُصنع صغيرة. وبعد، فهذا يقلل الوزن الكلي والتكلفة الكلية للمعجل. وعلى سبيل المثال فان س م م في « بروك هافن » والذي يعتبر سينكروتروناً قوي التركيز يعطي بروتونات عند طاقة ٣٠ ب إف ومع ذلك يزن صلب مغناطيسه ٤٠٠٠ طن فقط اذا قورن بالـ ١٠٫٠٠٠ طن من صلب مغناطيس « البيفاترون » ذي طاقة ٦٫٢ م إف فقط. كذلك، لو قورن بالسينكروفازوترون، فبالرغم من أن طاقة الأخير ١٠ ب إف ليس الا فان صلب مغناطيسه يزن ٣٩٫٠٠٠ طن. وهكذا نرى أن الاقتصاديات المطورة واضحة بشكل مثير وعلى الأخص فيما يتعلق بالزيادة الهائلة في الطاقة. هذا، ونعطي فيما يلي وصفاً مختصراً لماكينة س م م.

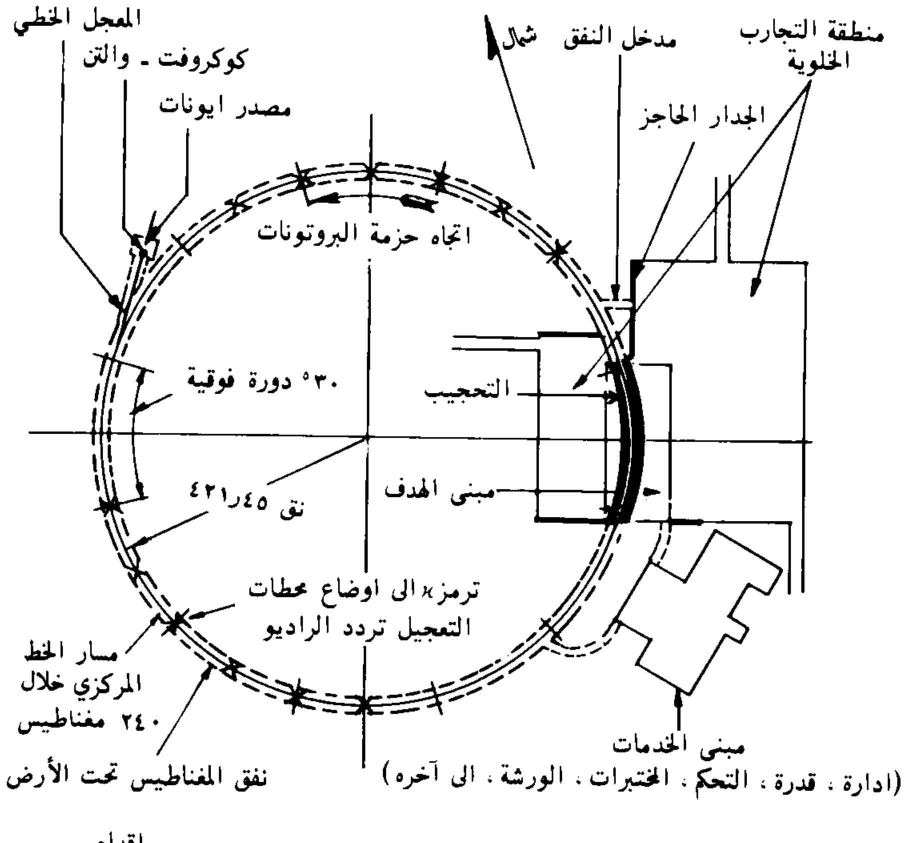
معجلات س م م ذات الطاقة العالية:

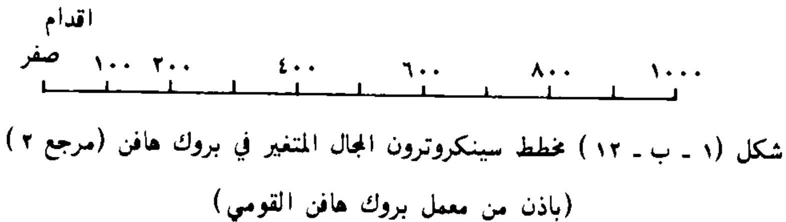
يوجد معجلان من نوع س م م قوي التركيز يكادان يكونان متكافئين لهما نفس الطاقة تقريباً تم بناؤهما في نفس الوقت: أحدهما في معمل « بروك هافن

الوطـني » وهو الـذي سيوصـف بـاختصـار هنـا ، والآخر في سيرن (المركز الأوروبي للبحوث النووية CERN) أصغر الى حد ما. ويُرى في شكل ١ ب ١٢ رسم تخطيطي لـ س م م في بروكهافن(٢). يتم تعجيل البروتونات من مصدر الأيونات الى ٧٥٠ ك إف بواسطة مولد كوكروفت - والتن لتحقن في معجل خطي طاقته ٥٠ م إف. وفي المعجل الخطي تمر البروتونات خلال ١٢٤ أنبوبة تدفق (drift tubes) ذات أطوال وأقطار متغيرة موضوعة على طول محور خزان مبطن بالنحاس بقطر حوالي متر واحد وطول ٣٣٫٥ متر. ويعتبر الخزان حاوي تفريغ وكذلك فجوة رنانة تزود بتردد ٢٠٠ ميجاسيكل/ث حتى أن الأنابيب المتجاورة تتذبذب في طور مضاد كهربائياً.

على أن البروتونات «تُضم» (bunched) في حزمة الأشعة بحيث تزيد المسافة الفاصلة بين «المضمومات» (bunches) مع السرعة داخل المعجل الخطي، وتلاقي كل «مضمومة» مجال تعجيل كهربي متردد التيار في الفجوة بين أنابيب التدفق. وبينما تمر «المضمومة» بسرعة ثابتة داخل الفتحة المحورية بأنبوبة التدفق تعكس ذبذبة الفجوة القطبية الكهربية للأنابيب لدرجة أن «المضمومة» تُعرَّض مرة ثانية لمجال معجِّل مع الوقت الذي تأخذه لتصل الى الفجوة التالية. وبالاختيار السليم للفلطيات وأطوال الأنابيب والمسافات الفاصلة تُعجل المضمومات في وقت واحد عند الفجوات المتناوبة على طول المعجل الخطي بأكمله. فذروة فلطيات الفجوة تتغير من ١١٦ كيلوفلط عند البداية الى ٨٩٠ كيلوفلط عند النهاية، وتتطلب الفجوة ٣ ميجاوات من القدرة عند ٢٠٠ ميجاسيكل/ث خلال التعجيل.

بعد ذلك تُنقل حزمة البروتونات من المعجل الخطي الى داخل حلقة السينكروترون خلال نظام حقن محكم «لازالة الضم» (debunching) وللحَرْف والتركيز وكذلك عُدة الاستنباء (monitoring gear). ويلاحظ أن قطر حزمة البروتونات عند الحقن تكون حوالي ١٫٧ بوصة وتياره عدة





شكل (١ - ب - ١٢) مخطط سينكروترون المجال المتغير في بروك هافن (مرجع ٢)

(باذن من معمل بروك هافن القومي)

ملي أمبيرات من البروتونات بانتشار زاوي كلي مقداره ٥ مليراديان ، وانتشار للطاقة بحوالي ١ر٠ في المائة.

ويوجد على حلقة السينكروترون ١٢ محطة تعجيل لتردد الراديو تتكون كل منها من فجوة تردد الراديو زوجية التنغيم لتفرض قوى تعجيل كهربية

على « مضمومات » البروتونات عند كل ممر بواسطة زوج من فجوات التعجيل التي جُعِلت محكمة التفريغ بعوازل من السيراميك. وعند كل محطة (من فجوتين) تعجل البروتونات بواسطة ٨٠٠٠ ڤلط ـ أي أن البروتونات تكتسب طاقة ٩٦ ك إف من المحطات الاثني عشر لكل عبور حول الحلقة. وعلى هذا الأساس ينبغي أن تمر البروتونات ٣١٢ر٥٠٠٠ مرة حول الحلقة لتكتسب طاقة ٣٠ ب إف.

ويجدر بالذكر أن المغناطيسات الرئيسية تؤدي وظيفتين:

(١) توجيه حزمة البروتونات في مسار دائري، و(٢) تجميع حزمة البروتونات. وقد سبق وصف هذه الوظائف من قبل. ففي سينكروترون بروك هافن س م م يوجد ٢٤٠ مغناطيس يحرف كل منها البروتونات بحوالي ١ر٥ درجة (٣٦٠° في الجميع). أما غرفة التفريغ البيضاوية الشكل تقريباً وبأبعاد داخلية ٣ × $\frac{1}{2}$ ٦ بوصة فتتمركز في الفجوة بين أقطاب المغناطيس. ويُحتفظ بضغط مقداره ١٠^-٦ مم زئبق في كامل غرفة التفريغ بواسطة ٤٨ مضخة من التايتينيام (جيتر) الأيونية موزعة حول الحلقة. وهذه الغرفة تُصنّع من مادة « انكونيل اكس » الغير مغناطيسية التي تقدم مقاومة كهربية عالية نسبياً ضد التيارات الدوامية (Eddy currents).

ومن الجلي أنه كلما تزايدت طاقة البروتونات أثناء التعجيل زادت كذلك كمية حركتها « ح »، ولكي نحتفظ بالمدارات ممسكة بالانحناءة الكلية للحلقة المحدثة بغرفة التفريغ يجب أن يزيد المجال المغناطيسي الحارف « مج » بالتناسب مع « ح »، ويطلب هنا زيادة ١٠٠ ضعف في « مج » في أكثر من ثانية بقليل وذلك في أعقاب الحقن عند مج = ١٢٠ جاوس. ومن أجل التوصل لقمة طاقة البروتونات تتكرر النبضة المعجلة ٢٠ مرة/دقيقة محتوية على ارتفاع للتيار من صفر الى ٦٥٠٠ أمبير في حوالي $\frac{1}{4}$ ١ ثانية، يتبعها نقص الى الصفر في حوالي ثانية، ثم فترة انتظار أقل من ثانية قبل بداية النبضة

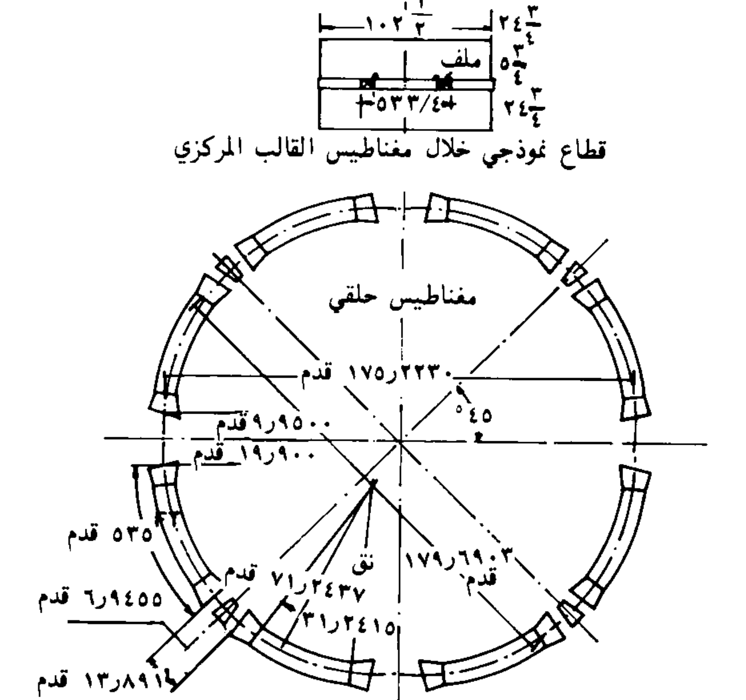
الثانية. وعند قمة التيار يُخزَّن حوالي ١٤ مليون جول من الطاقة في المجال المغناطيسي للمغناطيسات مع استنفاد أكثر من ١٠ مليون وات على شكل حرارة في مقاومة ملفات المغناطيس. لذلك تحمل مياه التبريد التي تنساب خلال الفتحة المحورية للملف هذه الحرارة بعيداً.

سينكروترون ميل الصفر (س م ص Zero Gradient Synchrotron):

لعل أحد عيوب سينكروترونات التجميع القوي أن الحجم الصغير لغرفة التفريغ يسمح بحقن «لفة» واحدة فقط في الماكينة، أي أن البروتونات تُحقن في الماكينة فقط ريثما تمر «اللّفة» الأولى في دورة كاملة، وهكذا لا يوجد فراغ أكثر داخل الماكينة لجسيمات اضافية وعليه فان الحاقن يوقف. ان هذا يحد من عدد الجسيمات التي يمكن تعجيلها بسينكروترون من هذا النوع مما يجعل الكثافة منخفضة. ومن ناحية أخرى يكون من الممكن أن نبني ماكينة ضعيفة التركيز ذات فتحة كبيرة القطر وبذلك يمكن حقن عدة لفات من الجسيمات داخلها بناتج عالٍ للكثافة.

ان سينكروترون ميل الصفر (س م ص) في معمل «أرجون القومي» ما هو الا معجل للتركيز الضعيف. الا أن وسيلة التركيز غير مماثلة لتلك في أي معجل آخر متواجد. ففي داخل جزء المغناطيس يكون المجال المغناطيسي متناسقاً (أي ميل صفري). ونظراً لأن مثل هذا المجال لا ينتج ذبذبات رأسية (ن = صفر، $\omega_{ص} = \omega\sqrt{ن}$ = صفر)، ولا يوجد قوى رأسية (قوة الارجاع = ن $\omega_{ص}^{2}$ = صفر)، لذلك يمكن الحصول على التجميع في هذا الاتجاه بأن نقطع نهايات المغناطيسات بحيث لا تكون عمودية على اتجاه حركة البروتونات في الجزء المستقيم، كما يُرى في شكل ١ ب ١٣[٣]. لعل هذا هو نفس نوع التركيز المستخدم لتركيز حزم الجسيمات الخارجية في مغناطيسات «الوتد» (wedge magnets). وبمعنى آخر يمكن أن يقال أن حافات المغناطيسات تُقطع بحيث

تكون ثمّة حديد أكثر على داخل المدار منه على خارج المدار. لذلك تنشأ حالات مماثلة لتلك التي تسود في ماكينة تقليدية ضعيفة التركيز.



شكل (١ ـ ب ـ ١٣) رسم تخطيطي لتجمع المغناطيس.
يوضح الرسم أوضاع ثمانيات المغناطيس الحلقي والاجزاء المستقيمة كذلك يرى مغناطيسات التيار المستمر المصححة التي توضع في مركز كل من الاجزاء المستقيمة القصيرة.

ان هذا التصميم الخاص للـ س م ص له عدة مزايا. فالمجال المغناطيسي الثابت في كل مكان داخل المغناطيس يسمح لتصميمه أن يكون بسيطاً للغاية وكفياً. وهو يسمح كذلك لمغناطيسه بأن يُدفع الى مجال مغناطيسي مرتفع جداً ـ كـأن يصـل الى ٢٢ كيلو جـاوس (حيـث يصـير الصلـب مشبعـاً بـالقوة المغناطيسية). ويلاحظ أن الفائدة في الحصول على مجال مغناطيسي مرتفع هو

أن نصف قطر الماكينة يمكن أن يُقلل لنفس الطاقة (ك ع = مج ش؍ نق).

وحيث أن وزن المغناطيس (وبالتالي تكلفته) يكون متناسباً بالتقريب مع مكعب نصف القطر، لذلك فان استخدام مجال مغناطيسي مرتفع يكون ذا فائدة عظيمة. كذلك نرى أن أبعاد المغناطيس وغرفة تفريغه (٣٢ بوصة عرضاً × $\frac{١}{٢}$ ٥ بوصة ارتفاعاً) تسمح بحقن حوالي مائة لفة من الجسيمات. وكنتيجة لهذا، تكون س م ص ماكينة ذات كثافة عالية لها القدرة على تعجيل ١٠^١٣ بروتون لكل نبضة، انها منظمة في ثمانية أجزاء (٨ ثُمن دائرة) حول محيط حلقة قطرها ٢٠٠ قدم.

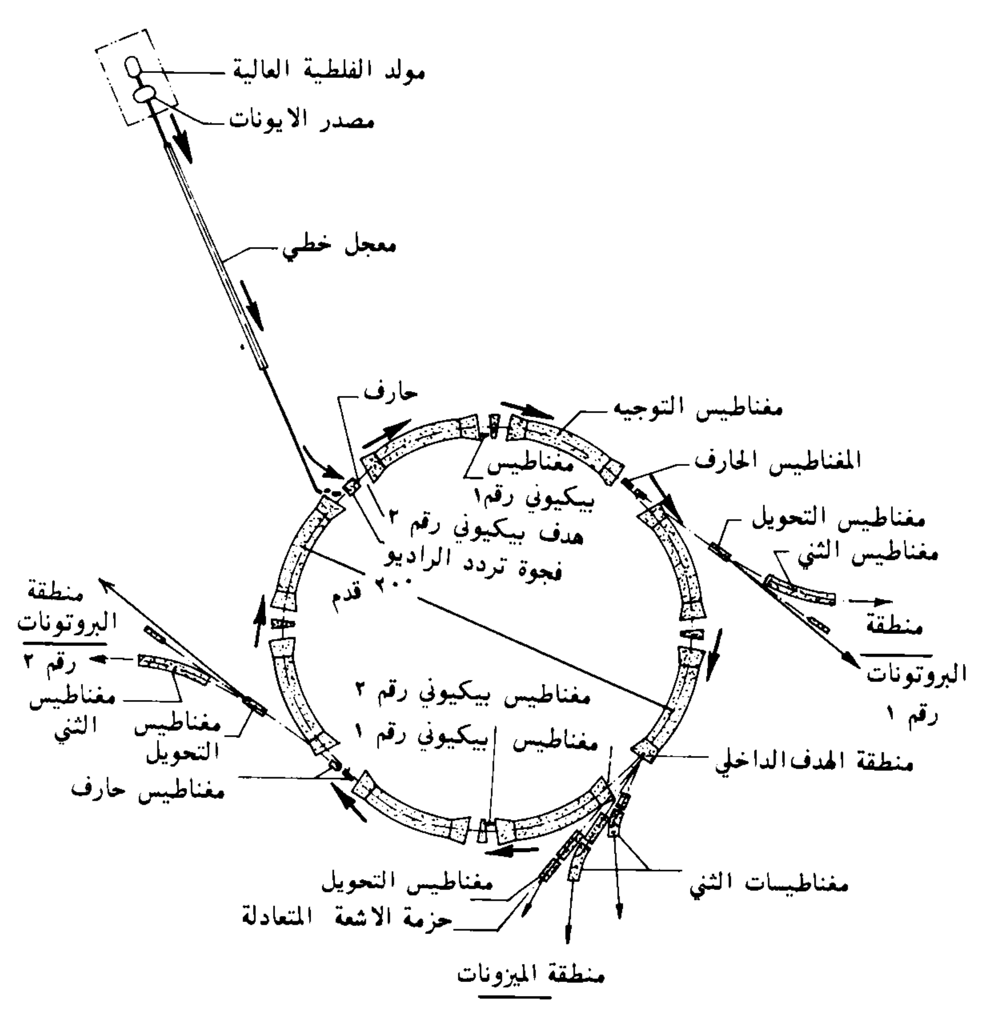
وصف الـ س م ص وطريقة تشغيله (شكل ١ ب ١٤)[٤]:

تحقن البروتونات في بناء المغناطيس من معجل خطي ٥٠ م إف بتصميم مماثل لتصميم معجل بروك هافن الخطي الذي سبق أن وصفناه. يستقبل المعجل الخطي حزمة البروتونات الكثيفة من حاقن مسبق ٧٥٠ ك إف يتكون من مولد تعاقب كوكروفت ـ والتن من النوع التقليدي الذي وصفناه في الجزء ١ ب ١، مستخدماً مقومات من السيلينيوم ومصمم لتشغيل نابض بدلا من تشغيل مستمر. وذلك لأن المعجل ذاته نابض، وكذلك لأن معجل الـ ٥٠ م إف ينبغي أن يكون نابضاً ففي البداية تدخل البروتونات الحاقن المسبق بعد أن تكون سُحبت من مصدر أيونات ذي تيار كبير من نوع الديوبلازماترون.

وقبل أن تُحقن حزمة أشعة الـ ٥٠ م إف في السينكروترون تمر داخل أنبوبة خالية للمجال حيث توضع أجهزة تشخيص حزمة أشعة البروتونات لقياس خواص الحزمة. ويتضمن ذلك استخدام محولات تيار لاستنباء حزمة البروتونات[٥] من أجل توضيح مستمر وقياس لتيار الحزمة بدون اعاقة للحزمة. كما تستخدم حلقات تردد الراديو للكشف الغير تدميري عن وضع حزمة البروتونات في الاتجاهات الرأسية والأفقية[٦]. أما الخاصية الثالثة المهمة

فهي قياس انبعاثية الحزمة (beam emitance) باستخدام قطب الشقات (strip electrode) عديد القنوات بالاشتراك مع فتحة ضيقة أعلى مجرى تيار البروتونات تعمل على مسح الحزمة في اتجاه مستعرض(٧). ويقوم مضاعف تتابعي (sequential multiplexer) واحد ميجاهيرتز الذي يختبر كل قناة لمدة ١ ميكروثانية باعطاء الخارج منه الى محطة معالجة المعلومات (data aquisition station) ذات سرعة عالية لتُرقم وتنقل الخارج من المضاعف التتابعي الى حاسب التحكم. ويتسنى بهذه الطريقة الحصول على معلومات تفصيلية عن الصورة الجانبية للحزمة وانبعاثيتها تحت الظروف المختلفة. هذا وتُحقن البروتونات في المغناطيس عندما يكون المجال المغناطيسي قد وصل قيمة ٤٧٢ جاوس. وبمعدل الارتفاع الابتدائي العادي للمجال المغناطيسي وقدره ٢٦ كيلوجاوس/ث تستمر عملية الحقن لمدة ٢٠٠ ميكرو ثانية الى أن تصل الجسيمات الأولى المحقونة الى وسط غرفة التفريغ، وفي هذا الوقت يجب أن يدار تردد الراديو حتى يمكن أن تزاد طاقة الجسيمات، كما شرح سابقاً، وذلك للاحتفاظ بالتدرج مع المجال المغناطيسي المرتفع. وتكون ذروة فلطية تردد الراديو التي تعجل البروتونات بينما هي تدور حول السينكروترون ٢٠ كيلوفلط. على أن تفصيلات تصميم المغناطيس، ونظام تردد الراديو، وتغذية القدرة للمغناطيس الحلقي فضلاً عن جميع تفصيلات التصميات الأخرى يمكن الرجوع اليها في المعلومات المنشورة(٨). ومع ذلك يلزم ملاحظة أن التحكم في حزمة البروتونات المعجلة يمكن تحسينه بواسطة أقطاب لاقطة (pickup electrodes) توضع في غرفة تفريغ السينكروترون لتعطي اشارة توضح الوضع القطري لحزمة البروتونات التي تدور حول الحلقة وكذلك الطور الخاص بالحزمة بالنسبة الى اشارة تردد الراديو. كذلك يوجد حوالي ١٥٠ اشارة زمنية مطلوبة لتجعل الماكينة تؤدي وظيفتها بفعالية.

ان هذه الاشارات الزمنية تعمل على التحكم في بدء نبضة التيار الى



شكل (١ ـ ب ـ ١٤) مخطط سينكروترون « ميل الصفر »

المغناطيس، وعملية الحقن، ونظام تردد الراديو، والمناولات العديدة للأهداف عند نهاية الدورة، وتتولد هذه الاشارات الزمنية بواسطة « مبرمج » باستخدام الأساليب الفنية الرقمية الحديثة.

هذا، وتُسحب حزم البروتونات الخارجية من الـ س م ص بواسطة نظام ابتكره دكتور أو. بيكيوني في معمل بروك هافن القومي. وبهذه الطريقة

يوضع هدف (بيريليوم في هذا المثال) في مسار البروتونات التي تدور في المغناطيس الحلقي. وتُخفض طاقة الجسيمات خلال سلسلة من اختراقات للأهداف الى أن يُؤسس مدار جديد وأصغر (نق = $\frac{ك ع}{ش أ مج}$)، وعند نقطة مناسبة حول الدائرة وفيما بعد الهدف ـ وذلك من أجل الافادة من طور متجه للخارج لذبذبات الجسيمات القطرية ـ يتسبب مغناطيس حارف في توجيه حزمة البروتونات نحو الخارج. ويزدوج هذا النظام للأهداف والمغناطيسات، (شكل ١ ب ١٤) وذلك ليتسنى تحقيق حزمتين للبروتونات منفصلتين وفي نفس الوقت في مبنيين للتجارب.

لقد كان اختيار طاقة الـ س م ص ليكون حوالي ١٢٫٥ ب إف من أجل ضمان انتاج جميع الجسيمات الأساسية المعروفة. وهذا يضع الطاقة في حوالي نصف طاقة الـ س م م في بروك هافن، وحوالي ضعف طاقة البيفاترون، مع توفر الميزة الرئيسية وهي أن كثافة حزمة البروتونات تكون أعلى بكثير.

معجلات الطاقة الفائقة الارتفاع:

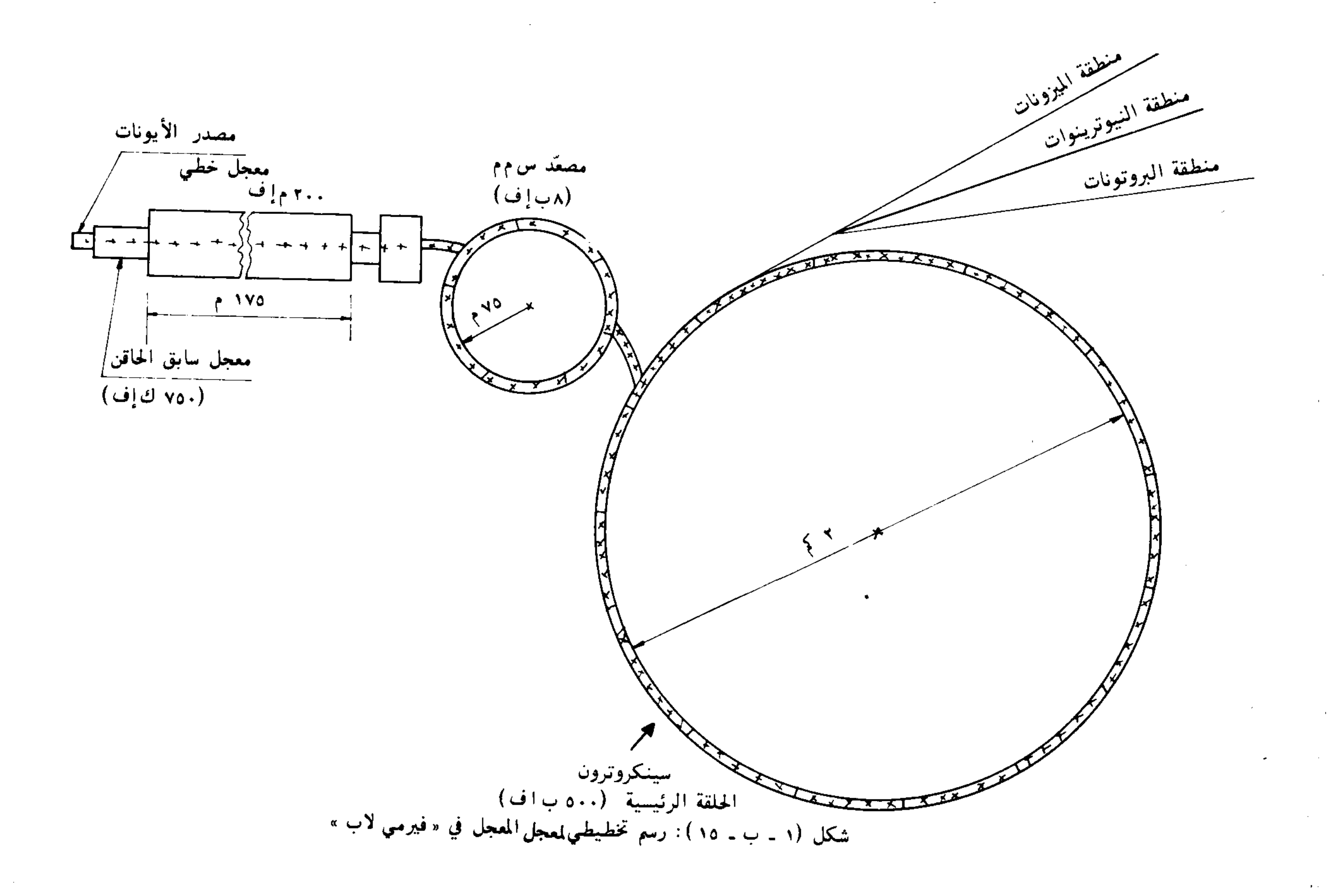
(Ultra - High - Energy Accelerators)

ان العديد من الاكتشافات المثيرة والمشوقة للغاية للجسيمات الغريبة الجديدة التي تحققت في المعجلات في مدى طاقة العشرات من البليون ڤلط الكتروني قد شجعت العلماء على البحث عن كثافة للحزمة أكبر بكثير وطاقة أعلى من أجل الهدف النهائي في محاولة التعرف أكثر على الجسيمات تحت النووية ومن أجل معرفة حقيقية للجسيمات الأولية وللكون الذي حولنا. ويلاحظ أن كل جيل جديد من المعجلات التي تعطي مدى جديداً للطاقة قد هيأت لنا نظرات أعمق في طبيعة الجسيمات الأساسية. فباكتشاف «الميزونات» و«الهيبرونات» والجسيمات الغريبة الأخرى ذات العمر القصير، وبمعرفة خواصها، رأينا تحولات جديدة بين هذه الحالات المثارة من المادة، كما لوحظت مبادىء جديدة مثل «الحفاظ على الغرابة» (conservation of strangeness)، كما وجد

أن هناك آراء جديدة مطلوبة في نظريات القوى النووية. كما أثيرت التساؤلات عن صحة القوانين الطبيعية الأهم من الناحية الأساسية (مثل تلك القوانين في الكهرديناميكية الكمية). وعلاوة على ذلك لوحظ أن تفاعلات النيوترينوات، التي لها اهتمام نظري جسيم، تتطلب تدفقاً أعلى بكثير من التدفق الخارج من السينكروترونات المتوفرة (التي وصفناها للتو) وذلك من أجل دراسة تشملها العناية والدقة. ولقد قُدمت بعض الأفكار والمبادىء لتصميم جيل جديد من المحطمات الذرية في مدى طاقة المئات من البليون فلط الكتروني[٩]، حيث وجد أن الاقتراحات الأكثر واقعية للحصول على معجلات ذات كثافة مفرطة وطاقة «فوق العالية» تتأتى بأن تُبسط المبادىء المستخدمة في معجلات الطاقة العالية السابقة مستخدمين التقنية المتقدمة لهذه الأيام في المجالات الهندسية المتعددة. ولقد جاءت مجموعتان دراسيتان من العلماء بأفكار عن تركيبات لمحطات عملاقة تعتبر متشابهة بصفة أساسية، احداها في معمل فيرمي القومي للمعجلات (إف إن إي إل، أو ما يسمى اختصاراً «فيرمي لاب») بأمريكا، وثانيها في «سيرن» بسويسرا. وسنعطي هنا وصفاً عاماً لمعجل فيرمي لاب، ثم نشير بعد ذلك لماكينة «سيرن» بأن نعدد الفروق الرئيسية بين المحطمين الذريين.

معجل «فيرمي لاب» ذي الطاقة العالية ٥٠٠ ـ ب إف

لقد صمم معجل «فيرمي لاب» للبروتونات بطاقة عالية ليعطي في الأصل طاقة قدرها ٢٠٠ ب إف، وقد انتهى البناء الرئيسي للمعجل في عام ١٩٧٢، أي أكثر قليلاً من ثلاث سنوات بعد بدء العمل، بطاقة قدرها ٤٠٠ ب إف، ضعف الطاقة المقترحة في تصميمه. وفي عام ١٩٧٦ رفعت الطاقة الى ٥٠٠ ب إف مما جعل معجل «فيرمي لاب» أكثر المحطمات الذرية قوة في العالم. وهو يتكون من أربع معجلات على التوالي (شكل ١ ب ١٥): يتكون المعجل المسبق من[٩] مصدر الأيونات، مصدر تغذية قدرة الفلطية العالية ٥٧٠ر.



شكل (١ ـ ب ـ ١٥): رسم تخطيطي لمعجل المعجل في « فيرمي لاب »

ميجاڤلط ، وعمود للتعجيل حيث تُعجل البروتونات الى طاقة ٧٥٠ كإف . ومن هذه النقطة تُوجَّه حزمة البروتونات الى معجل خطي خلال فجوة تردد عال لضم البروتونات (buncher). يتكون المعجل الخطي من تسعة فجوات للتعجيل يحدث رنينها عند ٢١٠ ميجاهيرتز بطول ١٧٥ متر ، وذروة للقدرة بقيمة ٣٧ ميجاوات . على أن التعجيل يتحقق حالما تمر حزمة البروتونات خلال مجالات كهربية شديدة تتولد على شكل موجات « واقعة » (standing waves) بين ٢٩٥ أنبوبة « تدفق » في الفجوات . هذا ، وتحتوي كل أنبوبة تدفق على مغناطيس رباعي الأقطاب ليتحكم في حجم الحزمة وفي حركياتها خلال عملية التعجيل . وعند تردد أساسي نابض قيمته ١٥ هيرتز يعجل المعجل الخطي حزمة البروتونات من ٧٥٠ كإف الى ٢٠٠ مإف .

وهناك اضافة حديثة للمعجل الخطي هي وحدة علاج السرطان الموضوعة بين الفجوة رقم ٤ والفجوة رقم ٥ حيث تُثنى حزمة البروتونات °٩٠ عند طاقة ٦٦ مإف عندما لا تكون الحزمة مستخدمة لأي تعجيل اضافي . والتطبيق الآخر لحزمة الـ ٢٠٠ مإف هو تجربة التصوير بأشعة البروتونات . هنا توجه البروتونات المحرَّفة والقادمة من هدف متحرك الى معدات الأبحاث ، كذلك دون التداخل مع بحوث فيزياء الطاقة العالية العادية .

وحالما تُنقل حزمة البروتونات الى مُصعِّد الطاقة (booster)، المعجل التالي ، تمر خلال فجوة تردد الراديو « المفرقة » (debuncher) من أجل تقليل انتشارية كمية الحركة . أما المصعِّد فهو عبارة عن سينكروترون سريع الدورات متردد الميل ذي نصف قطر ٧٥ متر . وهو يحتوي على ٩٦ مغناطيس طول كل منها ١٠ قدم ولها خواص تجميع وثني الحزمة . على أن تعجيل الحزمة الأيونية يُنجَز بواسطة مجالات كهربية تتولد بفجوات تردد الراديو موزعة على ١٨ موقع . ويستغرق التعجيل حوالي ٣٣ ملّي ثانية حيث تزيد سرعة البروتونات من β = ٥٧ر٠ الى β = ٩٩ر٠ ، وبسبب هذا التغير في السرعة يندفع تردد

الراديو من ٣٠ الى ٥٣ ميجاهيرتز مع تعجيل الحزمة من ٢٠٠ م إف الى ٨ ب إف . ومن المصعّد يمكن نقل الحزمة الى جهاز « امتصاص الطاقة » (dump) أو الى المعجل الرئيسي الذي يُدعى الحلقة الرئيسية (main ring) .

والحلقة الرئيسية هي سينكروترون بنصف قطر كيلومتر واحد ، وتحتوي على ٧٤٤ مغناطيس ثني و ٢٤٠ مغناطيس رباعي الأقطاب . كما أن مغذيات القدرة ، وأنظمة المياه ، ومعدات السطح البيني (interface) للحاسبات الآلية والأجزاء المعدنية (hardware) اللازمة لها تقع في ثلاثين مبنى خدمات موزعة على مسافات متساوية حول الحلقة . وتُقسم الحلقة الى ستة قطاعات بواسطة أجزاء مستقيمة خالية المجال طول كل منها ٥٠ متراً ، ويوجد في المرجع « ٩ » تفصيلات عن استخدامات هذه الأجزاء ، ويبلغ متوسط معدل التعجيل حوالي ١٢٥ ب إف/ث ، كما أن التشغيل العادي يكون عند ٤٠٠ ب إف بمسطح ثانية واحدة للنبضة وزمن دورة مقداره ١١ ثانية . وقد كانت كثافة حزمة البروتونات المسجلة ٢ر٥ × ١٠^١٣ بروتون/نبضة - أمكن التوصل اليها في الحلقة الرئيسية . ويرجع ذلك الى المجهود المشترك بين زيادة تيار المعجل الخطي والى أكثر من قيمة الـ ٧٥ ملي أمبير العادية وتغيير متغيرات طول نبضة حقن « المصعِّد » ذي الأربع لفات الى حقن ذي لفة واحدة . وقد استلزم هذا التغيير تطويراً مكثفاً لعمود التعجيل ليعطي تياراً ولمعاناً (brightness) لحزمة البروتونات أعلى بكثير . كما أن تطويرات اضافية قد أدخلت لتساعد على جعل الحزمة المسحوبة أكثر نفعاً لبحوث فيزياء الطاقة العالية .

ويجدر بالذكر أن التشغيل السهل للمعجل وللحزم الأيونية الخارجية تتحقق بواسطة خمس من القائمين بالتشغيل في حجرة التحكم الرئيسية الذين يستنبئون - ويتحكمون في - جميع حزم الأشعة الى الأهداف الأولية لكل منطقة تجريبية ، شكل ١ ب ١٦ . وفي هذا الصدد نرى أن التحكم عن بعد لهذه المناطق يكون ممكناً بسبب الوضع المبدئي لنظام تحكم للحاسب الآلي الالكتروني في نظام مع

معجل خطي

المصعَّد

مطياف فردي الذراع

منطقة الميزونات

منطقة النيوترينو

غرفة الفقاعات
١٥ بوصة

مطياف الميون

تجهيزات عدد ٧

غرفة فقاعات ٣٠ بوصة

منطقة
البروتونات

المعجل الرئيسي

منطقة
الاهداف
الداخلية

الحزم الاولية
الحزم الثانوية
الاهداف

شكل (١ ـ ب ـ ١٦) مخطط للامكانات في «فيرمي لاب» (مرجع ٩)

حاسبات آلية مصغرة (minicomputers) وذلك في شبكة تخطيطها دقيق بما يجعل كل المعلومات متاحة للقائمين بالتشغيل (١٠).

الفروق بين سينكروترون البروتونات ٥٠٠ ب إف في « فيرمي لاب » وسينكروترون ٤٠٠ ب إف في « سيرن »

للمراقب العفوي تبدو الماكينتان - سينكروترون الـ ٥٠٠ ب إف في « فيرمي لاب » والـ ٤٠٠ ب إف في « سيرن » - متشابهتين الى حد بعيد، وحتى تكلفة المشروعين كادت أن تتساوى. ومع ذلك توجد بعض الفروق التي نذكرها فيما يلي:

(١) في ماكينة « فيرمي لاب » يغذي البروتونات للحلقة الرئيسية سينكروترون مُصعِّد ومعجل خطي حاقن، في حين تستخدم ماكينة « سيرن » السينكروترون س م م - ٢٨ ب إف والذي يخدم البحوث « بسيرن » ليغذي الحلقة الرئيسية.

(٢) تردد نظام التعجيل في الحلقة الرئيسية لماكينة « فيرمي لاب » هو ٥٣ ميجاهيرتز، بينما التردد في ماكينة « سيرن » ٢٠٠ ميجاهيرتز.

(٣) لقد بُـني نفق ماكينة « فيرمي لاب » بطريقة « القطع والملء » (cut and fill) بالقرب من سطح موقع منبسط، في حين وضعت ماكينة « سيرن » عميقاً تحت الأرض في نفق محفور في الصخرة العالية في سفح موقع جبلي. ونتيجة لذلك توجد عدة مداخل أفقية الى نفق الحلقة الرئيسية، كما توجد أعمدة رأسية يتراوح عمقها بين ٢٥ م و٦٠ م.

(٤) يجري التحكم في سينكروترون « سيرن » بواسطة نظام للحاسب الآلي الالكتروني، مع عدم تواجد أرفف للمعدات الالكترونية التي يراها المرء

عادة في غرفات التحكم - بل ثلاثة مناضد فقط براسمات للحاسب الآلي ولوحات اللمس حيث يمكن تشغيل الماكينة بأسرها من أي واحد منها.

ويبلغ طول محيط سينكروترون « سيرن » سبعة كيلومترات. وأخيراً تحقق الحصول على حزمة للأيونات الدوارة بطاقة ٤٠٠ ب إف للمرة الأولى في ١٧ يونيو ١٩٧٦، وقد استغرق البناء خمس سنوات وأربع شهور بعد اعتماد المشروع.

التطوير التقني لبناء معجلات ذات طاقات أعلى بكثير من ٥٠٠ ب إف

لقد لعب كل من المحطم النووي ٥٠٠ ب إف في « فيرمي لاب » والـ ٤٠٠ ب إف في سيرن دوراً رئيسياً في الكشف عن بعض خبايا المادة. وقد كان هناك اكتشافات مثيرة للعديد من الجسيمات تحت - النووية مثل « الباريون المفتون » (charmed baryon) المكتشفة في عام ١٩٦٧ والتي صارت مثالاً « للفتنة العارية » (naked charm) التي أيّدت الكثير من التخمين عن الكواركس « المفتونة » (charmed quarks). كذلك فان الاكتشافات الأكثر إثارة لجسيم جديد تحت - النووي في « فيرمي لاب » كان في مايو ١٩٧٧ والذي سُمي « أبسيلون ٧ » وهو يعتبر أثقل الجسيمات تحت النووية المكتشفة؛ فكتلته أثقل بأكثر من عشرة مرات من كتلة البروتون. وفي سيرن تتركز الدراسات على البحث عن « كواركس » جديدة.

وبهذه الاستمرارية للاكتشافات يحاول العلماء تطوير نظريات أساسية، وفي نفس الوقت يستخرجون الكثير من الأشياء التي يكتشفونها في تجارب فيزياء الطاقة العالية. ولا تزال التساؤلات تثار عن طبيعة المادة. لذلك فان المحاولات مستمرة في تجارب على فيزياء الطاقة العالية لإماطة اللثام عن متناهيات الصغر في الذرة واللانهائي للكون.

وبالرغم من أن معجل البروتونات في « فيرمي » يعتبر أكبر محطم ذري في

العالم ، فهو ما زال ليس كبيراً بما يكفي لكي نرى الجسيمات المتناهية الصغر والتي خُلِقت مع بداية الزمن .

ربما يمكن القول أن وسيلتين تقنيتين تُتّبعـان حالياً لانشاء ماكينات بطاقة مفرطة الارتفاع ، احداها في تقدم الآن « بفيرمي لاب » وتستخدم مغناطيسات مفرطة الموصِّليـة (superconducting) للغرض المزدوج لرفع المجال المغناطيسي بشدة ولتقليل استهلاك القدرة الكهربية في نفس الوقت فيما يسمى بمشروع « المضاعف/المقتصد » (doubler/ saver) . وتستغل الوسيلة الثانية الزيادة العنيفة للطاقة مما ينتج عن تصادم حزم الأشعة الأيونية ذات الطاقة العالية . وسنشرح فيما يلي كلا من هاتين الوسيلتين التقنيتين .

ماكينة « مضاعف/مقتصد » الطاقة[١١] :

لقد أخذ بعين الاعتبار في التصميم المبكر جداً للسينكروترون الأساسي في « فيرمي لاب » امكانية بناء حلقة من مغناطيسات الموصلية المفرطة . وقد استُنتـج أن تقنيـة المغنـاطيسات المفرطـة الموصِّليـة لم تكن في ذلك الوقت (١٩٦٧) متقدمة بما فيه الكفاية . لذلك صممت الحلقة الرئيسية وبُنيت بمغناطيسات تقليدية . ومع ذلك فقد تركت مسافة في نفق الحلقة الرئيسية لحلقة مستقبلة من المغناطيسات المفرطة الموصلية . على أنه مع التقدم في تقنية الموصِّلية المفرطة ، بدىء في مضاعف/مقتصد الطاقة في عام ١٩٧٢ كمشروع لبناء حلقة من المغناطيسات المفرطة الموصِّلية بهدف إحداث زيادة عنيفة في امكانات البحوث لمعجلات « فيرمي لاب » . وكان لهذا أن يُنجز بتكلفة معتدلة وبالطريقة التي تجعل من الممكن توفير قدر هائل من الطاقة الكهربية . ويذكر هنا أن الطاقة الممكن التوصل اليها سترتفع في النهاية الى ١٠٠٠ ب إف في حلقة المغنـاطيس المفرطـة الموصِّليـة بسبب الزيـادة الضخمـة في المجـال المغناطيسي ، بينما تُقطع تكاليف القدرة الكهربية بخمسين في المائة . وسينجز

ذلك باستخدام المعجل الخطي الكائن، والمصعِّد والحلقة الرئيسية كلها كحاقن لمضاعف/مقتصد الطاقة.

ولقد خطط لاستكمال هذا المشروع أن يهدف الى اعطاء حزمة أيونات بطاقة ١٠٠٠ ب إف، مع تزويد المنطقة اللازمة لتداخل الحزم المتصادمة والارتفاع بقدرة مناطق التجارب المتواجدة من أجل زيادة طاقة الهدف الثابت.

وفي وقت اعداد هذه الدراسة تركز معظم النشاط التطويري لمشروع مضاعف/مقتصد الطاقة على المغناطيسات الزوجية الأقطاب المفرطة الموصلية نظراً لانها تعتبر الأكثر الحاحاً بالنسبة لأجزاء التصميم المتعددة والأعظم صعوبة في التنفيذ. ويمكن أن نجد التفصيلات في المرجع ١٢، ولقد ركز برنامج تطوير ثنائي الأقطاب ذي طول قدم واحد على:

(أ) التحقق من نوعية الموصل، (ب) اثبات تقنية التجميع واللف التي ستؤدي الى الوضع الصحيح للموصل، (ج) تزويد التقييد الكافي للموصلات، (د) تقليل حركة الموصلات أثناء الاثارة بتزويد تحميل مسبق كافي للموصلات حتى تكون الحركات المرنة للموصلات داخل حزمة الملف في حدود التفاوتات المسموح بها.

وبعد ذلك أُثبت أن نتائج نموذج «القدم - الواحد» يمكن تقديرها استقرائيا بصفة مباشرة لتشمل حالة مغناطيسات الاثنين وعشرين قدماً. ومن ناحية أخرى أوضحت حالات التبريد الشديد (cryostats) حِمْلاً حرارياً ساكناً الى ٤٫٥° مطلق بمتوسط ٨ وات وهو الذي يكون في حدود التفاوت المسموح به في تصميم عملية التبريد (refrigeration design).

وقد صنعت المغناطيسات الرباعية الأقطاب من «كوابل» مفرطة الموصِّلية لتلك المستخدمة في ثنائيات الأقطاب، كما أنه يلزم توصيلها كهربياً

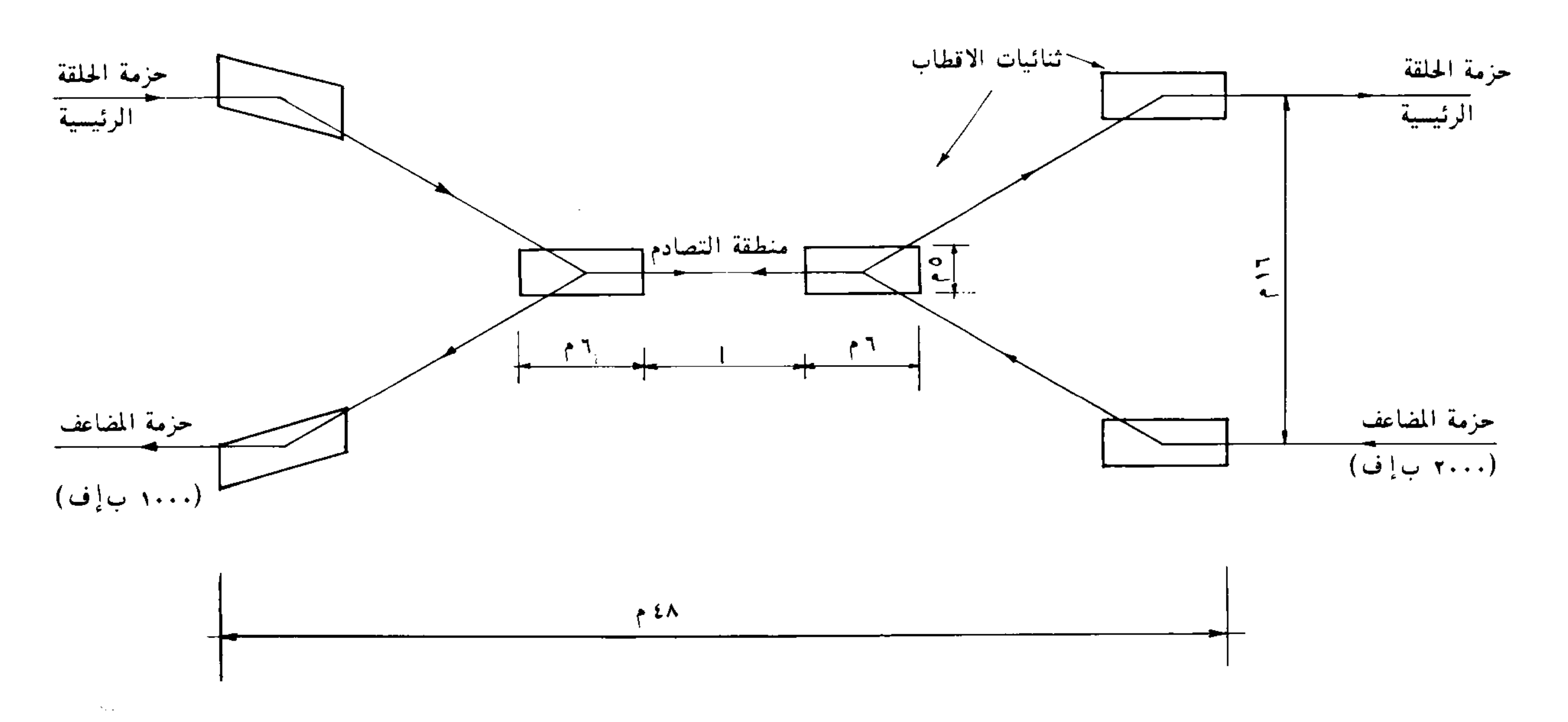
على التوالي مع ثنائيات الأقطاب. هذا وتتكون معدات تبريد مضاعف/مقتصد الطاقة من مسيل مركزي للهيليوم يعمل على تزويد الهيليوم بمعدل ١٠٠ لتر في الساعة لكل واحدة من ٢٤ مبردات هيليوم موزعة عند كل محطة خدمة حول الحلقة الرئيسية.

وعلى الجانب الآخر، كان هناك برنامج بحوث في تقدم بتشغيل مغناطيسات الموصلية المفرطة على التوالي في محاولة لتفهم الخواص التشغيلية لمضاعف الطاقة[١٣]. وقد أعطي انتباه خاص للفواقد الساكنة في أجهزة التبريد الشديد وأداء الملفات ومعدات درجات الحرارة المنخفضة أثناء إزالة التبريد. وقد أظهرت النتائج أن مغناطيسات مضاعف/مقتصد الطاقة يمكن تشغيلها بأمان بالقرب من حد قصر الدائرة، وأن أجهزة الأمان المختلفة المستخدمة تعتبر كافية لحماية الملفات وأجهزة الدرجات المنخفضة من التدمير.

إن تقارب حزمتين للأيونات المعجلة في نفس النفق يجعل من احتمال تصادم هذه الحزم امكانية واضحة الجاذبية. ولانجاز ذلك يجب أن نجعل من الممكن تشغيل أي من الحلقات في أي من الاتجاهات. وسيكون تسلسل التجارب التي ستتبع لتحقيق التوصل الى حزمة بروتونات بطاقة ١٠٠٠ ب إف على النحو التالي (شكل ١ ب ١٧):

(١) باستخدام الحلقة الرئيسية كحاقن بطاقة ١٠٠ ب إف لمضاعف/مقتصد الطاقة، بينما تُعجل البروتونات في اتجاه ضد عقارب الساعة (أي عكس تشغيلها العادي)، يمكن أن يُملأ المضاعف/المقتصد بحزمة بروتونات تدور كذلك ضد عقارب الساعة. ويمكن أن تُختزن هذه الحزمة عند ١٠٠ ب إف أو تعجل ببطء شديد في المضاعف/المقتصد وتُختزن عند طاقات عالية.

(٢) يمكن أن تُعكس حزمة بروتونات الحلقة الرئيسية بعد ذلك الى اتجاهها العادي ويمكن احضار الحزمتين معاً في مناطق التداخل.



شكل (١ ـ ب ـ ١٧) التشكيل الهندسي للحزم المتصادمة (مرجع ١١)

(٣) تكون بعد ذلك الامكانية متاحة لتداخل البروتونات مع البروتونات عند طاقات ١٠٠ ب إف على ٤٠٠ ب إف.

(٤) يمكن بعد ذلك سحب الـ ٤٠٠ ب إف من الحلقة الرئيسية وتسليمها الى مناطق التجارب للبرنامج العادي لفيزياء الحزم الأيونية الخارجية. ويعطي هذا النمط من التشغيل دورة اداء صغيرة نسبياً للحزم المتداخلة غير أنه بتحسين التفريغ في الحلقة الرئيسية يمكن التصور بأن الحزم المختزنة تستخدم عند أي طاقة في تواؤم مع القيود على الطاقة اللازمة لاستثارة مغناطيسات الحلقة الرئيسية في نمط التيار المستمر مدداً طويلة (لأكثر من ساعة واحدة).

(٥) وبمجرد ما يستكمل الطور الثاني للمضاعف/المقتصد للطاقة فان حلقته يمكن أن تُملأ وتُعجَّل الحزمة الى طاقة حتى ١٠٠٠ ب إف.

حزم الطاقة العالية المتصادمة:

ان التطوير التالي نحو تحقيق طاقات « فوق ـ العالية » فيما بعد الألف بليون فلط الكتروني والمتوقع من « مضاعف/مقتصد » الطاقة يبدو وكأنه آتٍ من التصادمات بين حزم الأيونات الدائرة في اتجاهات متضادة، بينما ينبغي أن تكون كثافة الحزم أعظم مما يمكن الحصول عليه في الوقت الحاضر بعدة أضعاف.

ولقد أشرنا في المناقشة السابقة عن « مضاعف/مقتصد » الطاقة الى عمليات تصادم الحزم الواجب اتباعها في تشغيل الماكينة. بيد أنه سيُعطى هنا بعض تحليلات أكثر وذلك بسبب أهميتها كوسيلة مغرية لتزيد بعنف طاقة الحزمة الممكن التوصل اليها.

وتاريخياً، عندما تحققت امكانية تصفيف الحزم في ماكينات « الميل المتردد ذي المجال الثابت (م م م ث) Fixed - Field Alternating Gradient

(FFAG)) وأدى التحليل الى الاستنتاج بأن الحزم الدوارة ذات ١٠ الى ١٠٠ أمبير صارت ممكنة تماماً ، بدأت مجموعة « مورا » (Midwest University Reseash Association «MURA») بأمريكا التفكير بنشاط في امكانية اجراء تجارب تتعلق بتصادم الحزم الأيونية . فعند الطاقات النسبية تُعطى الطاقة الحركية المتحصل عليها بالتعبير الآتي[١٤] .

$$\text{طا}_{\text{ح}} = \text{طا}_{\text{صفر}} \left[\left(٢ + \frac{٢\ \text{طا}}{\text{طا}_{\text{صفر}}} \right)^{١/٢} - ٢ \right] \qquad (١٣)$$

حيث طا = الطاقة الكلية للبروتون ، $\text{طا}_{\text{صفر}}$ = طاقة سكونه وقدرها ٩٣٨ م إف .

وعليه فلو اعتبرنا بعض المعجلات في الجدول « ا » لحصلنا على قيم للطاقة الحركية المتاحة محسوبة من المعادلة (١٣) ، كما نرى في الجدول التالي :

جدول رقم (٢)

المعجل	طاقة الحزمة (ب إف)	الطاقة الحركية المتاحة (ب إف)
الكوزموترون ن	٣	٠٫٨٤١
سينكروفازوترون	١٠	٢٫٦٥٣
سينكروترون ميل الصفر في« أرجون »	١٣	٣٫٢٣٧
سينكروترون الميل المتردد في « سيرن »	٢٨	٥٫٤٩
سينكروترون « فيرمي لاب »	٤٠٠	٢٥٫٥٤

وبالنظر الى هذه الأرقام استنبطت مجموعة مورا أنها يمكن أن تصنع معجلين ١٥ ـ ب إف وتدرس التفاعلات في نظام « مركز الكتلة » (Centre - of - Mass System) حيث جميع طاقة الثلاثين ب إف متاحة؛ ان هذه الماكينة المزدوجة يمكن أن تكون مكافئة لماكينة منفردة طاقتها ٥٤٠ ب إف (طبقاً للمعادلة ١٣) وذلك فيا يتعلق بالتفاعلات النووية. من أجل ذلك أجريت دراسات مكثفة على مبدأ « القطاع اللولبي » (spiral sector) ولماكينة م م م ث ذات القطاع القطري(١٥). وقد استكمل كذلك نموذج الكتروني ثنائي الاتجاه بطاقة ٤٠ م إف(١٦) مبكراً في عام ١٩٦٠ واختبر بنجاح. على أن الدراسة المفصلة المتصلة بتصميم ثنائي الاتجاه ذي ١٥ ب إف جعلت فيزيائيي الطاقة العالية في ذلك الوقت مترددين في امكانات دراسة التفاعلات النووية في منطقة تصادم الحزم التي يصعب الوصول اليها. فالضغط في غرفة التفريغ يجب أن يُحتفظ به في مرتبة الـ ١٠^-٩ مم زئبق، وإلا فان نواتج تفاعلات الحزم المتصادمة ستكون مبهمة بخلفية هائلة نظراً للاصطدامات مع أنبوبة الغازات المتخلفة، ومن ناحية أخرى تكون تكلفة بناء ماكينتين بالغة الارتفاع. ولهذه الأسباب ظهر من غير المحتمل في عام ١٩٦٠ أن تلقى الحزم المتصادمة اعتباراً فورياً، وأنها يمكن أن تُنتج بطريقة واقعية بمعجل واحد متواجد أصلاً مع حلقتين للتخزين.

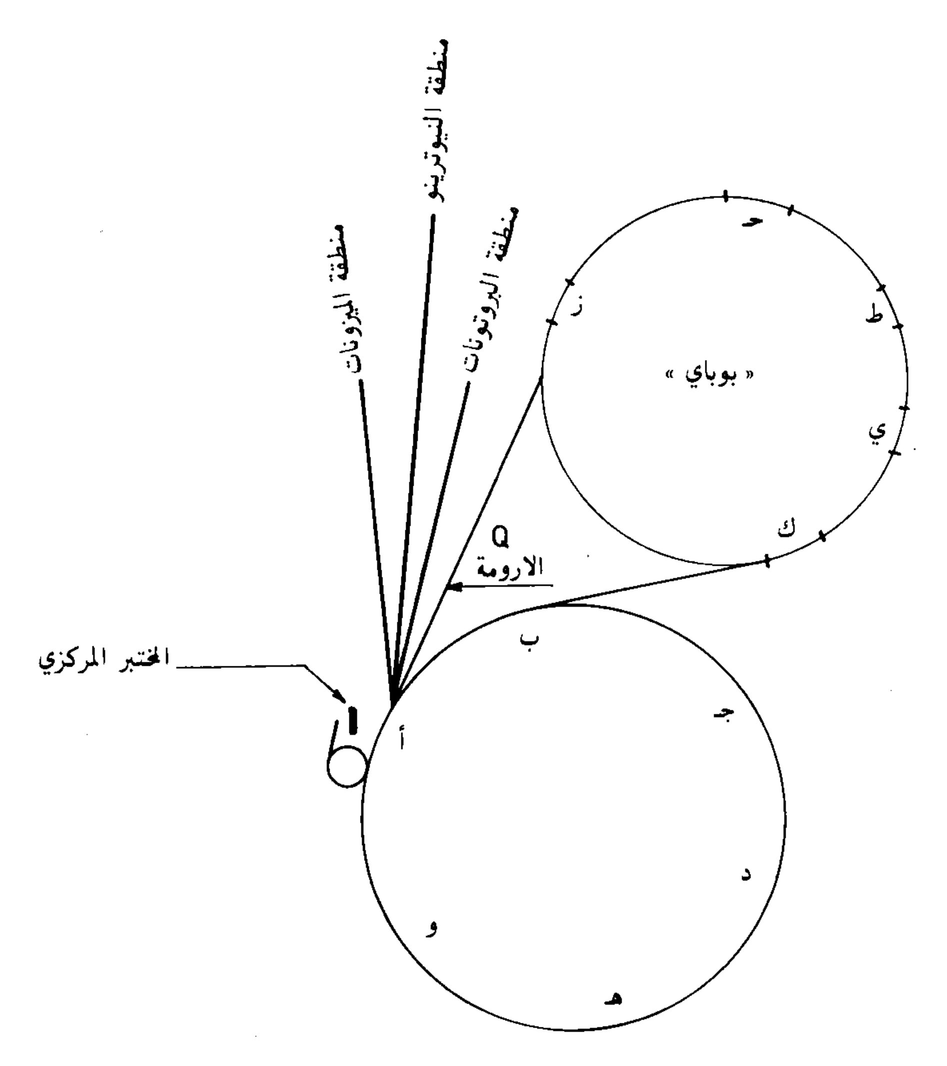
وتستغل حلقة التخزين نفس المبدأ. فلو أن حزمة من معجل حُوِّلت في تعاقب الى مدارين مغناطيسيين متقاطعين، فان التيارات التي تدور يمكن تكاثرها الى مئات الأمبيرات خلال زمن معقول بحيث تصير كل حزمة هدفاً الأخرى ويكون مجموع الطاقات الحركية متاحاً للاثارة. ويشابه هذا الوضع بطريقة ما ذلك الذي وُصف في مضاعف/مقتصد الطاقة.

ولقد اقترح في وقت سابق أن تزود معجلات البروتونات طاقة الاثارة في تداخل البروتونات مع البروتونات بما يعادل طاقة خارجة أعظم بكثير.

ولعل أحدث تطوير نحو استخدام تقنية الحزم المتصادمة ذلك المشروع الرائع المعروف باسم « بوباي » (POPAE) الذي يرمي الى بناء امكانية تتكون من حزم متصادمة بروتون ـ بروتون من ١٠٠٠ ب إف على ١٠٠٠ ب إف. ولقد طُور الاقتراح أثناء دراسة مكثفة أجريت بواسطة مجموعة من العلماء من معمل فيرمي القومي بالمشاركة مع مجموعة أخرى من معمل أرجون القومي في أمريكا[١٧]. ولقد أفادت هذه الدراسة من خبرة سيرن في مركب حلقات التخزين المعروفة باسم « آي إس آر » (ISR)[١٨] ومن التصميات السابقة في معمل فيرمي بالاضافة الى دراسات حلقات تخزين الطاقة العالية التي أجريت في معمل بروك هافن القومي (ايزابيل ISABELLE)[١٩] وفي سيرن (إل إس آر LSR)[٢٠]. ويلاحظ أنه لتحقيق نفس طاقة « مركز الكتلة » ٢٠٠٠ ب إف بمعجل ذي هدف ثابت يتطلب ذلك حزمة طاقتها أكثر من ٢ × ١٠^{٦} ب إف. وعليه فان الفائدة العظمى للحزم المتصادمة ،كما رأينا سابقاً، هي الطاقة البالغة الارتفاع والتي يمكن الحصول عليها لانتاج جسيات ثقيلة أو للكشف عن أنواع جديدة للتفاعلات والقوى. مع ملاحظة أن طاقة « مركز الكتلة » « طا » تتزايد في معجلات الهدف الثابت مع الجذر التربيعي « لطاقة المختبر » طا$_{م}$ ليس الا ، حيث طا $\cong \sqrt{١٫٨٨ \text{ طا}_{م}}$ ، ووحدات الطاقة هنا هي ب إف.

وفي الحزم المتصادمة يكون الوضع أفضل بكثير ، فتكون طا = ٢ طا$_{م}$ ، حيث طا$_{م}$ هي طاقة المختبر لكل من البروتونات في تصادم « على الرأس » (head - on collision). إن الطول الكلي لمحيط ماكينة « بوباي » ٥٥٢٠ متر بما في ذلك ستة أجزاء مستقيمة. على أن الحقن من الحلقة الرئيسية « لفيرمي لاب » أو من مضاعف/مقتصد الطاقة سيكون بالطاقة المطلوبة للتفاعلات متجنبين بذلك التعقيد الغير مؤكد وتكلفة تعجيل حزم بالغة الكثافة في حلقات التخزين ذاتها. وسوف تتطلب كل حلقة ٥٧٠ مغناطيس

مفرط الموصلية ثنائي الأقطاب ، طول كل منها ٢ر٦ م ؛ ويكون المجال المطلوب عند ١٠٠٠ ب إف هو ٦٠ كيلوجاوس ، كما انه بالنسبة لتيار بروتونات قدره ٥ أمبير في كل حلقة عند طاقة ١٠٠٠ ب إف ، يصمم ايلاج سطوع مرتفع (high luminosity insertion) ليعطي قيمة قدرها ٤×١٠^٣٣/سم^٢/ث ، والتي تعتبر أعلى بدرجتين عن القيم المتحصل عليها من الـ «آي . إس . آر » . ومن ناحية أخرى فان معامل زيادة قدره ١٠٠٠ في طاقة ماكينة « بوباي » ذات الهدف الثابت فوق طاقة ماكينة الـ «آي . إس . آر » ستؤدي بالتأكيد الى ظواهر تعتبر في الغالب جديدة ومثيرة للاهتمام ويمكن أن يجد القارىء تفاصيل متغيرات التصميم لماكينة « بوباي » في المرجع ١٧ . ويرى في شكل ١ ب ١٨ تحديد مشروع بوباي في موقع « فيري لاب » .



شكل (١ ـ ب ـ ١٨) تحديد موقع بوباي من مكان « فيرمي لاب »

المراجع

١ - «Some Elements of Particle Accelerator Theory», J.J. Livingood, Argonne National Laboratory, November 1963.

٢ - «The Brookhaven Alternating Gradient Synchrotron» Science, Vol. 128, No. 3336, December 1958, PP 1393 - 1401.

٣ - «The Zero Gradient High Intensity Proton Synchrotron», A.V. Crewe, Proceedings of 1961 Western Electronic Show and Convention, San Francisco, August 1961, paper 33/3.

٤ - High Energy Physics at Argonne National Laboratory», Book published at Argonne National Laboratory, A.V. Crewe, D.R. Getz, R.H. Hilderbrand, L.S. Markheim, D.A. Carlson, September 1963.

٥ - «Design Characteristics of Beam Current Monitors», Parts I and II, Mohamed E. Abdelaziz, Argonne National Laboratory, MEA - 3, Jan. 1961 and MEA - 4, July 1961.

٦ - «Beam Diagnostics of the 50 - MeV Proton Linear Accelerator of the Zero Gradient Synchrotron», Mohamed E. Abdelaziz, Roland Perry, Proc. of 1968 Proton Linear Accelerator Conference, Brookhaven National Lab., May 20 - 24, 1969, BNL 50120 (C - 54) p 198 - 219.

٧ - «Beam Emittance - Time Variations of the 50 - Mev Proton Linear Accelerator of the Zero Gradient Synchrotron», Mohamed E. Abdelaziz, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS - 16, No. 3, June 1969, p.356-358.

«Several Reports About Design Details have been published at - ٨
Argonne National Laboratory on various aspects of the ZGS.»

Operating Experience with the Fermi Lab 500 Gev Acelerator» G.S. - ٩
Urban and J.C. Gannon, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.
NS - 24, No. 3, June 1977.

«Interaction of Accelerator Controls and Diagnostics», Micheal F. - ١٠
Shea, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS - 22, No. 3,
1975.

«Status of the Fermi Lab Energy Doubler/ Saver project, Philip V. - ١١
Livdahl, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS - 24, No. 3,
June 1977.

«Proceedings of the 1976 Applied Superconductivity Conference» - ١٢
W.B. Fowler.

Operation of Multiple Superconducting Energy Doubler Magnets in - ١٣
Series», G. Kalbfleisch, P.J. Limon, C. Rode, IEEE Transactions on
Nuclear Science, Vol. NS - 24, No. 3, June 1977, pp 1239 1241.

«Particle Accelerators», Livingston and Blewett, McGraw Hill Book ١٤
Company, 1962, p 635.

T. Ohkawa, Rev. Sci. Inst., 29: 108 (1958). - ١٥

Proceedings of the International Conference on High Energy - ١٦
Accelerators and Instrumentation of 1959 (Geneva) p. 71.

«POPAE - A 1000 Gev Proton - Proton Colliding Beam Facility», D. - ١٧
Ayres and others, IEEE Trans. on Nucl. Sci., Vol. NS - 24, No. 3,
June 1977.

IEEE Transactions on Nuclear Science, NS - 22, 1358 (1975). - ١٨

«A Proposal for Construction of a Proton - Proton Storage Accelerator - ١٩
Facility ISABELLE.» BNL - 18891 (1974) and BNL - 20161 (1975),
(Unpublished).

B. Autin et al., CERN/ISR - LTD/ 75 - 46 (1975), (Unpublished). - ٢٠

أ جـ . المعجلات الخطية (Linear Accelerators)

لقد أشرنا في الأجزاء السابقة الى مبدأ تشغيل المعجل الخطي في أثناء وصف معجلات الطاقة العالية المستخدمة للمعجلات الخطية كحاقنات للسينكروترونات ، كما في حالة الـ « سي بي إس » (سينكروترون البروتونات في سيرن) ، والـ « زي جي إس » (سينكروترون ميل الصفر في معمل أرجون القومي) وفي المحطم الذري ٥٠٠ ـ ب إف في « فيرمي لاب » . كذلك أُشيرَ الى المعجلات الخطية عند وصف مبدأ ثبات الطور(phase stability principle) .

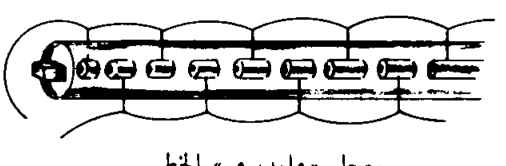
وسنعطي فيما يلي تفاصيل أكثر عن الأنواع الأساسية المعروفة المستخدمة في تعجيل الالكترونات أو البروتونات والأيونات الثقيلة ، فضلاً عن بعض التطويرات الحديثة في تقنية المعجلات الخطية .

معجل « سلون » الخطي الرنان
(The Sloan Resonance Linear Accelerator)

من أجل التحقق من بساطة مفاهيم معجلات الرنين المبكرة من ابتكار وايديرو[١]من ناحية ، وسلون ولورانس[٢] من ناحية أخرى ، لنعتبر سلسلة من أنابيب التدفق المتحدة المحور بأطوال متزايدة ومصفوفة على طول محور غرفة للتفريغ كما يرى في شكل ١ جـ ١ . هذا وتوصل الأقطاب (الأنابيب) الفردية الأقطاب الى أحد الأطراف ، كما توصل الاقطاب الزوجية الى الطرف الثاني ، وتُغذى قدرة التردد العالي على الطرفين بحيث يظهر المجال الكهربي بانتظام ، وفي « طور » صحيح ، على سلسلة فجوات الأقطاب التي تفصل أنابيب التدفق بمسافة « ل » تعطى بالقيمة الآتية :

$$\text{ل} = \text{ع}\,\frac{\text{ز}}{٢} = \frac{\text{ع}}{٢\,\text{د}} = \frac{\text{ع}\,\lambda}{٢\,\text{ع}_{\text{ض}}} = \frac{\lambda}{٢\,\text{ع}_{\text{ض}}}\sqrt{\frac{٢\,\Delta\,\text{طا}}{\text{ك}}} \qquad \text{١ جـ ١}$$

حيث ع = سرعة الجسيم ، د = تردد مجال التعجيل ، λ = طول موجة



معجل «وايديرو» الخطي

شكل (١ - جـ - ١)

المجال ، ك = كتلة الجسيم ، $\text{ع}_{\text{ض}}$ = سرعة الضوء ، Δ طا = الطاقة المكتسبة عندما يعبر الجسيم الفجوة = ١/٢ ك $\text{ع}^{٢}$ = $\text{ش}_{\text{أ}}$ ف ، حيث ف = فلطية الفجوة القصوى ولكي نحصل على طول المعجل ، علينا أن نجد طول الفجوات المتتابعة على النحو التالي :

$$\text{ل}_{\text{أ}} = \frac{\lambda}{\text{ع}_{\text{ض}} \sqrt{\text{٢ ك}}} \sqrt{\Delta\ \text{طا}} = \sqrt{\Delta\ \text{طا}}$$

$\text{ل}_{٢} = \text{م} \sqrt{٢ \Delta\ \text{طا}}$ ، $\text{ل}_{٣} = \text{م} \sqrt{٣ \Delta\ \text{طا}}$ ، ... $\text{ل}_{\text{ن}} = \text{م} \sqrt{\text{ن} \Delta\ \text{طا}}$ ، ... ،
$\text{ل}_{\text{ي}} = \text{م} \sqrt{\text{ي} \Delta\ \text{طا}}$

وعليه ، يكون الطول الكلي للمعجل

$$\text{ل} = \text{م} \left(\sqrt{١} + \sqrt{٢} + \sqrt{٣} + \ldots + \sqrt{\text{ن}} + \ldots + \sqrt{\text{ي}} \right) \sqrt{\Delta\text{طا}}$$

$$= \sum_{\text{ن} = ١}^{\text{ن} = \text{ي}} \text{م} \sqrt{\text{ن}} \sqrt{\Delta\text{طا}} \qquad ١ \text{ جـ } ٢$$

لذلك فان طول المعجل يتحدد بطول موجة مجال التردد العالي المستخدم وبفلطية الفجوة . وفي معجل سلون ولورانس الخطي[٢] استخدمت طول موجة ٣٠ متر (١٠ ميجاسيكل) في تركيب يستعمل ٣٠ أنبوبة تدفق بفلطية للفجوة

مقدارها ٤٢٠٠٠ فلط للذروة، وكان الطول الكلي للمعجل الخطي ١٤ر١ م وطاقة أيونات الزئبق الفردية الشحنة ٢٦ر١ م إف.

معجل «الفاريز» موجِّه الموجة

(The Alvarez Waveguide Linear Accelerator)

ان المعجل الخطي الثاني وهو النوع الأوسع انتشاراً هو ذلك الذي يستغل فجوة عالية النوعية (high - Q) تثار بكمية كبيرة من قدرة التردد العالي. وكان البناء المعجِّل في التصميمات المبكرة يتكون من موجة للالكترونات محمل «بحدقات» (iris - loaded) يستخدم كلايسترونات التردد العالي (٣٠٠٠ ميجاسيكل على سبيل المثال). ولقد بدأ تطوير معجلات البروتونات الخطية حوالي عام ١٩٤٤ في جامعة كاليفورنيا (المعمل الاشعاعي Radiation Laboratory) في الوقت الذي جُعلت فيه قدرة التردد العالي في متناول اليد بسبب التقدم الذي أحرز في صناعة الرادار. وكان «الفاريز» هو الذي وجّه البرنامج الجديد لتطوير المعجل الخطي. هذا، ويمكن فهم الفرق بين نوعي المعجلين الخطيين بالرجوع الى المعادلة التي تعطي القيمة الدنيا المسموح بها لطول الموجة[٣].

$$\lambda_{\text{دنيا}} = ١٠ \, \text{نق}_{\text{قصوى}} \left(\frac{\text{ع}_{\text{ض}}^{٢}}{\text{ع}^{٢}} - ١ \right)^{١/٢} \qquad \text{١ جـ ٣}$$

حيث نق$_{\text{قصوى}}$ هي ١/٢ نصف قطر الفتحة. وهنا تحدد $\lambda_{\text{دنيا}}$ القيمة القصوى المرغوب فيها لتردد التشغيل. وعليه فان المعادلة ١ جـ ٣ توضح أنه بالنسبة للالكترونات التي تقترب سرعتها من سرعة الضوء خلال معظم المعجل، لا يوجد تقييد حقيقي لطول الموجة. على أنه بالنسبة للبروتونات التي تكون سرعاتها في المعجل عند نهايته ذات الطاقة الصغرى بما يقدر بعشر سرعة الضوء، فان الطول الأدنى للموجة المسموح به يكون مقيداً بصرامة. وفي

العادة تؤخذ فتحة ٣ سم كبعد معقول ، وهي الحالة التي ينبغي فيها أن يكون طول الموجة أعظم من ١ر٥ م (من المعادلة ١ جـ ٣). وهكذا فان التردد الأقصى المسموح به يكون ٢٠٠ ميجاسيكل . وهذا في الواقع هو التردد المختار لمعظم معجلات البروتونات الخطية ، وذلك مثلما رأينا في وصف المعجلات الخطية الحاقنة لسينكروترونات البروتونات ذات الطاقة العالية . ومن ناحية أخرى ، فان من الممكن أن نرفع التردد الذي تعمل به معجلات الالكترونات الخطية الى قيم في المدى من ٣٠٠٠ الى ١٠٠٠٠ ميجاسيكل قبل أن تحدث قيود خطيرة للفتحة لأسباب أخرى . وهذا يجعل الأمر أكثر جدوى لتصميم تركيبات لُموجِّه المَوْجَة ذات حجم أصغر وسهولة أداء اكبر . لذلك ، فبينما تُحتَوى معجلات البروتونات الخطية في خزانات ضخمة (بقطر يقدر بثلاثة أقدام) تكون رنانة عند ٢٠٠ ميجاسيكل ، يمكن أن تتكون معجلات الالكترونات الخطية من

شكل (١ ـ جـ ـ ٢)

معجل ألفاريز الخطي

هذا ، ويتم تقدير الطول الكلي للمعجل الخطي مُوجِّه الموجات (شكل ١ جـ ٢) بأن نعتبر أطوال الفجوات المتتالية :

$$\text{ل}_{١} = \text{ع}\ \text{ز} = \frac{\text{ع}}{\text{د}} = \frac{\text{ع}\ \lambda}{\text{ع}_{\text{ض}}} = \frac{\lambda}{\text{ع}_{\text{ض}}}\ \Delta\ \text{ع} = \beta\ \Delta\ \text{ع}$$

$$\text{ل}_{٢} = \beta\ ٢\ \Delta\ \text{ع}\ ،\ \text{ل}_{٣} = \beta\ ٣\ \Delta\ \text{ع}\ ،\ \ldots\ \text{ل}_{\text{ن}} = \beta\ \text{ن}\ \Delta\ \text{ع}\ \ldots$$

$$\text{ل}_{\text{ى}} = \beta\ \text{ى}\ \Delta\ \text{ع}$$

$$\text{ل}_{\text{الكلية}} = (١ + ٢ + ٣ \ldots + \text{ن} + \ldots + \text{ى})\ \Delta\ \text{ع}$$

أو $ل_{الكلية} = \frac{\lambda}{ع_{ض}} \quad \frac{ى\,(ى+١)}{٢}$ ١ جـ ٣

أجزاء من موجهات الموجة ذات ٣٠٠٠ ميجاسيكل بقطر يقدر بقليل من البوصات.

وتعالج المراجع العلمية مشكلات أنماط المجالات داخل مُوجِّه الموجة وأشكال عملها، وكذلك استقرارية الطور وديناميكات الجسيم والموجات الساكنة والمتحركة ومتطلبات القدرة وتركيز حزمة الأيونات، بالاضافة الى مشاكل تقنية أخرى متعددة. ويلاحظ أن معجل الالكترونات الخطي الأعظم قوة والذي بُني حق الآن هو المعجل ذو طول ميلين في جامعة ستانفورد بأمريكا، والذي بدأ تشغيله في عام ١٩٦٦. وتقدر طاقة حزمة الالكترونات في (سلاك) اختصاراً لمركز ستانفورد للمعجل الخطي (Stanford Linear Accelerator Center) بعشرين ب إف. وهذه الطاقة المرتفعة، بالاشتراك مع امكانات أخرى للبحوث يجعل «سلاك» واحداً من أعظم المراكز العلمية أهمية لبحوث فيزياء الجسيمات. وهناك مشروع سلاك المدعى (سبير) (SPEAR) ـ الذي يقع في الجانب الشمالي لمحطة النهاية «اي» (A) بموقع سلاك ـ يتكون من حلقة بيضاوية الشكل بطول حوالي ٢٠٠ قدم عبر نهاياتها وتقوم بتخزين حزم الالكترونات والبوزيترونات ذات الطاقة العالية التي تدور في اتجاهات متضادة والتي ينتجها المعجل الخطي ذي الميلين طولا. ويمكن أن تجعل الحزم تتصادم في واحد أو اثنين من مناطق التفاعلات، بما يساعد على دراسة نواتج التصادمات كما تحققت اكتشافات هامة متعددة في مجال فيزياء الجسيمات الأولية في سلاك.

وبحلول عام ١٩٨٠ سيعمل مكافىء ضخم «لسبير»، وهذا يدعى بيب (PEP) اختصاراً لمشروع البوزيترونات الالكترونات Positron Electron Project). وبطول قدره ٢٫٤ كم لمحيطه، يعتبر بيب مشروعاً مشتركاً بين معمل لورانس بيركلي ومركز المعجل الخطي بستانفورد.

ان بعض الامكانات الهامة التي تخدم البحوث في الوقت الحاضر هي المختبر الاشعاعي للسينكروترون في ستنانفورد ، ومبنى معدات التبريد الشديد ، ومبنى التجميع الخفيف وغرفة الفقاعات ، بقطر ٤٠ بوصة .

المراجع

١ - R. Wideroe, Arch. Elektrotech., 21: 387 (1928).

٢ - .D.H. Sloan and E.O. Lawrence, Phys. Rev., 38: 2021 (1931)

٣ - M.S. Livingston, J.P. Blewett, «Particle Accelerators», Mc Graw - Hill Book Company, 1962 (p 315).

١ د البيتاترون

يمكن أن يعتبر البيتاترون محولاً ذا قلب حديدي يثار بواسطة ملف أولي يدار بتيار متردد، في حين تتكون الدائرة الثانوية من واحدة أو أكثر من الجسيمات المشحونة حرة الحركة في التفريغ ولكنها مقيدة بالمجال المغناطيسي لتدور حول القالب. وتُنتِج القوة الدافعة الكهربية التي يحدثها التدفق المغناطيسي المتغير عزماً على الشحنات حتى تُعجل بصفة مستمرة. ويزود التدفق المتغير في المدار العزم وشدة المجال المغناطيسي التي تعطي قوة الاستدارة عند المدار. فاذا كان على الشاحنات أن تتحرك في دائرة بنصف قطر ثابت، كما في البيتاترون، يجب أن تتواجد علاقة محددة بين التدفق والمجال تعرف على أنها نسبة الـ ١ :٢. فاذا كان التدفق المغناطيسي « ϕ » في دائرة بنصف قطر « نق » تتغير مع الزمن فتكون القوة الدافعة الكهربية (ق د ك) التي تنشأ حول الدائرة:

$$\text{ق د ك} = \dot{\phi} \qquad (١ د ١)$$

واذا كانت شدة المجال المحيطي مج$_{ك}$، فيكون: ٢ ط نق مج$_{ك}$ = $\dot{\phi}$، أو مج$_{ك}$ = $\frac{\dot{\phi}}{٢\text{ط نق}}$ وهي التي عندما تؤثر على شحنة ش$_{أ}$، تنتج عزماً = ش$_{أ}$ مج$_{ك}$ نق. وهذا العزم سيساوي معدل التغير الزمني لكمية الحركة الزاوية

$$\frac{د}{د\ ز}\ (\text{ك ع نق}) = \frac{\text{ش}_{أ}\ \phi}{٢\ \text{ط}} \qquad (١ د ٢)$$

في حالة الحركة الدائرية في مجال مغناطيسي تكون

$$\frac{\text{ك ع}^{٢}}{\text{نق}} = \text{مج ش}_{أ}\ \text{ع}$$

وبذلك يكون: ك ع نق = مج ش$_{أ}$ نق^{٢}، وعليه فان

$\frac{د}{د\ ز}$ (ك ع نق) = مخ شأ $نق^{٢}$ (بالنسبة الى «نق» ثابت).

وبمقارنة هذه القيمة الخاصة للعزم المطلوب من أجل حركة دائرية بالعزم ذي الصفة العامة المنتج بواسطة التدفق المتغير، نرى أنه ينبغي أن يكون لدينا

$مخ_{٢}$ شأ $نق^{٢}$ = $\frac{شأ\ \phi}{٢\ ط}$ ، أو ، ٢ مج = $\frac{\phi}{ط\ نق_{٢}}$ ١ د ٢

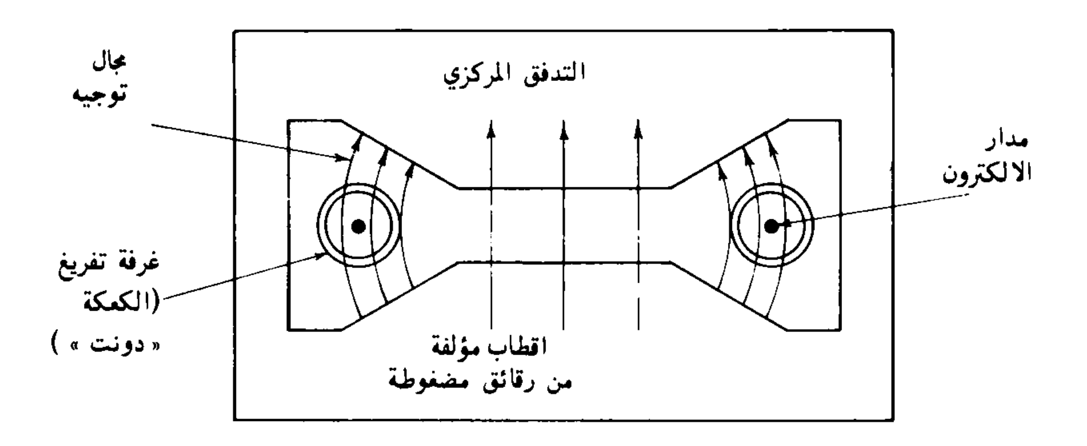
والتي تعني أنه اذا أريد للتدفق المغناطيسي المتغير أن ينتج حركة معجلة في دائرة بنصف قطر ثابت لوجب أن يكون ضعف المجال عند المدار مساوياً لمتوسط المجال في المدار. ومن السهل أن نرى أن التدفق في المدار يجب أن يكون له نفس الاتجاه كالمجال الذي يوجه الحركة (steering field).

ان الجسيمات التي تُحرَّر في غرفة تفريغ كبيرة بين أقطاب مغناطيس اسطواني يتزايد فيه التدفق ستتلولب خارجياً الى أن تصل الى نصف القطر الذي يحدث عنده الظرف الحرج، ثم تستمر بعد ذلك في ضبط حجم مدارها الى قيمة التصميم المطلوبة.

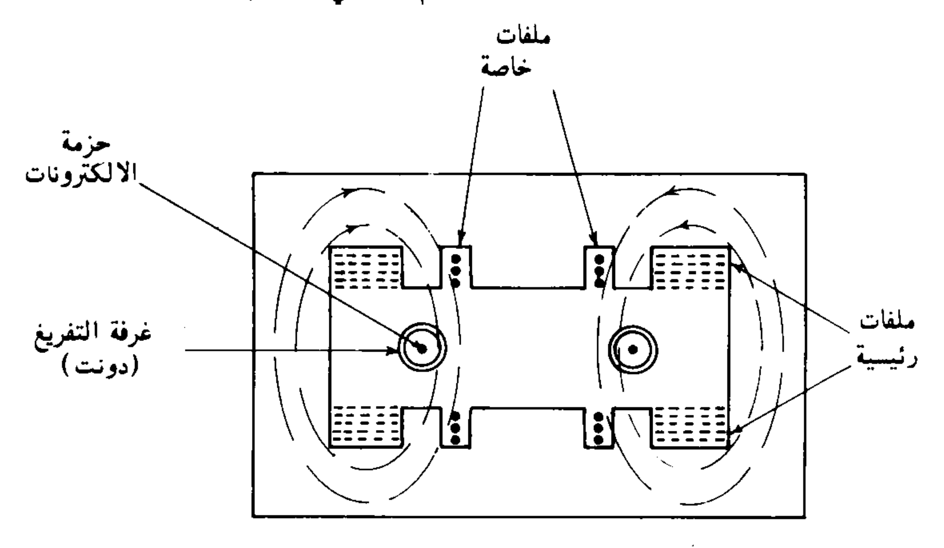
وتقع غرفة التفريغ الكعكية («دونت» Doughnut) في المجال المغناطيسي السليم كما يرى في شكل ١ د ١. ولكي نحتفظ بالالكترونات في نصف قطر ثابت داخل غرفة التفريغ (دونت) تستخدم قطع خاصة من الحديد مركزية بملفات خاصة لتنتج المجال المتوسط الصحيح.

على أن الالكترونات تُحقن من بندقية الكترونية داخل «الدونت» عند لحظة زيادة التدفق من الصفر، وتدور مع زيادة في الطاقة كلما ارتفعت قيمة التدفق مع الزمن خلال الربع الأول من دورة التيار المتردد، وعند الذروة تستخدم نبضة لسحب الالكترونات المعجلة خارج غرفة التفريغ (دونت).

وتعود الانجازات في مجال زيادة الطاقة بماكينات البيتاترون الى المجهودات



شكل (١ ـ د ـ ١) رسم تخطيطي للبيتاترون



شكل (١ ـ د ـ ٢)

المتواصلة للفيزيائي « كيرست » ـ من جامعة « إللينوى » بأمريكا ـ والذي أجرى المحاولة الأولى الناجحة بانتاج الكترونات بطاقة ٢ر٣ مإف في عام ١٩٤٠[١] والتي أعطت أشعة سينية بكثافة تعادل كثافة أشعة « جاما » من جرام واحد من الراديوم.

أما البيتاترون الثاني لكيرست والذي صُنِّع في مختبر بحوث شركة جنرال اليكترك فقد أنتج الكترونات ٢٠ م إف في عام ١٩٤٢[٢]. واستتباعاً لذلك بنيت البيتاترونات بطاقات تصل الى ١٠٠ م إف في مختبرات أخرى. (وأخيراً بنى كيرست في عام ١٩٥٠ بجامعة إللينوى أكبر بيتاترون حيث كانت الماكينة ذات ٣٠٠ م إف[٣] نتيجة عمل مكثف على ديناميكيات الجسيمات وتصميم المغناطيس وانحياز التدفق (flux biasing) ومشكلات الاستقرارية المدارية.

على أن التقييد الخطير لزيادة الطاقة في البيتاترونات هو ما يسببه الاشعاع من فقد للطاقة يزيد بمقدار القوة الرابعة لطاقة الالكترون. وتوضح الحسابات[٤] أن فقد الطاقة يبدأ يكون ذا قيمة كبيرة عند طاقات فوق ١٠٠ م إف. وعلى سبيل المثال فان الالكترون بطاقة ١ ب إف في بيتاترون بنصف قطر ١٠ م يفقد ٨٨٥٠ إف من الطاقة لكل دورة، وهي كمية يكون من الصعب تزويدها بالاساليب الفنية للبيتاترون.

المراجع

١ - D.W. Kerst, Phys. Rev., 58: 841 (1940).

٢ - D.W. Kerst, Rev. Sci Inst., 13: 387 (1942).

٣ - D.W. Kerst, et al., Phys. Rev., 78: 297 (1950).

٤ - M.S. Livingston, J.P. Blewett, «Particle Accelerators», Mc Graw Hill Book Company, 1962 (p 216).

ملحق للباب الأول
مفاهيم تصميات حديثة لمعجل فيرميلاب المفرط المُوصّلية

بعد استكمال هذا التقرير في يونيو ١٩٧٩ ، جاءتني مراسلة خاصة (أ) بتقريرين حديثين يبينان أن أعمال التصميم الحديثة قد أتت بمعجل فيرميلاب الى تصور تصميمي مختلف بعض الشيء وذلك باستخدام حزم مضاد البروتون والبروتون التي تدور ضد بعضها مما يؤدي الى طاقات تفاعل أعلى في حلقة « مقتصد الطاقة » .

ولكي يتضمن هذا التقرير أحدث المعلومات يشار هنا الى أهداف تصميم التطوير الجديد لمعجل الموصلية المفرطة ، والذي يرى مقطع له في شكل ١ ـ ١ (ب) ، سوياً مع مقطع مغناطيس الحلقة الرئيسية .

على أن وظائف الحزمة التي يتم تأديتها تُنظّم في المقاطع المستقيمة الطويلة الستة التي ترى في أشكال ١ ـ ٢ و١ ـ ٣ (ب) ، حيث :

مقطع أ : قناة استخراج البروتونات ، كذلك الحقن والاستخراج للحلقة الرئيسية .

مقطع ب : منطقة تصادم الحزم .

مقطع جـ : أنظمة « الاجهاض » ، كل من بي ، بيَ* ، ونظام تحجيب « المحك » ، كذلك اجهاض بي ، بي للحلقة الرئيسية .

(*) بي : بروتون ، بيَ : بوزيترون .

مقطع د : حاجز الاستخراج والتحجيب ، كذلك منطقة ثانية محتملة للتفاعل .

مقطع هـ : أنظمة الحقن ، كل من بي ، بيَ ، لنقل الحزم من الحلقة الرئيسية .

مقطع و : نظام تعجيل التردد العالي .

ولذلك فان وظائف ممارسة الحزمة المطروحة في المقاطع الستة الطويلة والمستقيمة هي[ب] :

(١) الحقن : بي الى الامام ، بيَ الى الخلف عند طاقة أعلى من ١٠٠ ب إف .

(٢) التعجيل : بالاضافة الى تعجيل حزمة بروتونات الى الأمام عند طاقة أكثر من ٥٠ ب إف ، فان على نظام التردد العالي أن يكون قادراً على تعجيل حزمة بروتونات أمامية وحزمة بوزيترونات خلفية في نفس الوقت وبأطوار مستقلة وقابلة للضبط للحزمتين .

(٣) استخراج حزمة البروتونات الأمامية ، نظام الاستخراج الرنان الذي يمكن أن يزود كلا من « رشات » الحزمة البطيئة (١ الى ١٠ ثانية) والسريعة (١ ملي ثانية) في موقع التحويل الحالي .

(٤) الاجهاض ، يجب أن يكون قادراً على اجهاض كل من حزمة البروتونات الأمامية وحزمة البوزيترونات الخلفية بالكفاءة القريبة من ١٠٠٪ .

(٥) منطقة تصادم الحزم ؛ سيخصص جزء مستقيم (طويل) واحد على الأقل للحزم المتصادمة (كلا من بيَ بي ، بي بي) . وسيكون هذا موقع الكاشف الرئيسي لتجارب الحزم المتصادمة .

(٦) تحجيب المحك : لكي نحصل على الكفاءة العالية المطلوبة للاجهاض والاستخراج يكون من الضروري أن يُشبك تحجيب المحك في نتوء محلي للمسار متولد بواسطة مغناطيسات تقليدية قادرة على تحمل مستويات اشعاع عالية . أما الجسيمات المشحونة الأقل طاقة في التعاقب النووي

فستجرف بعيداً في المجال المغناطيسي ، والمنطقتان عاليتا الاشعاع هما منطقة حاجز الاستخراج ، ومنطقة اجهاض الحزمة. هذا وسوف يركب تحجيب محك ضخم في كل من هاتين المنطقتين. واضافة الى ذلك ، سيكون تحجيب محك أبسط للتركيب في مقاطع مستقيمة مصغرة ومتوسطة عند رباعي القطب ليحمي ملفات المغناطيسات المفرطة الموصلية من الحزمة الشاردة.

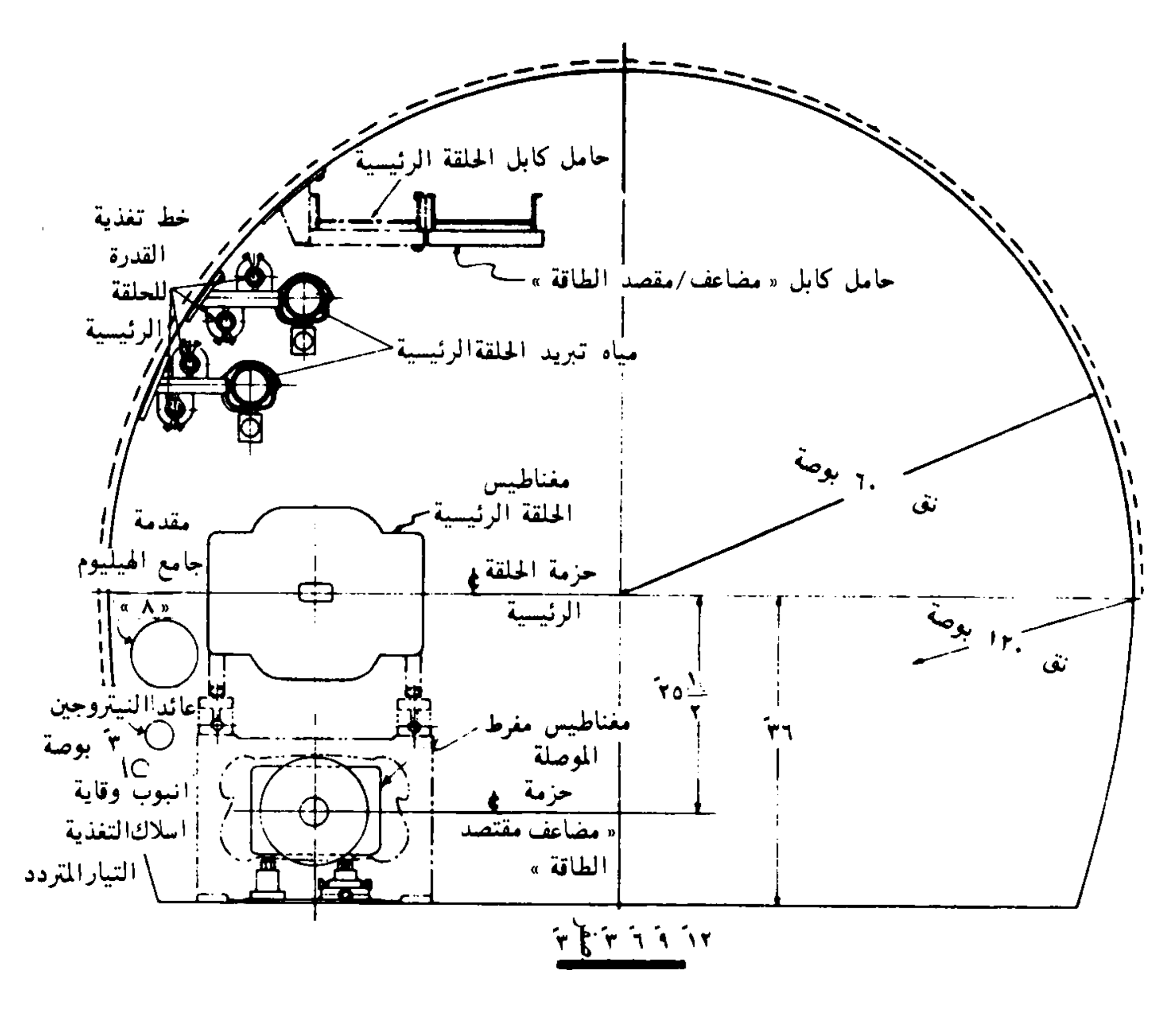
وبهذه الأهداف التصميمية ستكون قمة طاقة الجهاز عند تشغيله كمعجل ثابت الهدف هي :

٨٠٠ ـ ١٠٠٠ ب إف ، وكمتصادم بي بَي (٨٠٠ ـ ١٠٠٠ ب إف) × (٨٠٠ ـ ١٠٠٠ ب إف) وكمتصادم بي بي : الحلقة الرئيسية ١٥٠ ـ ٢٠٠ ب إف ، وحلقة مفرط الموصلية ٨٠٠ ـ ١٠٠٠ ب إف.

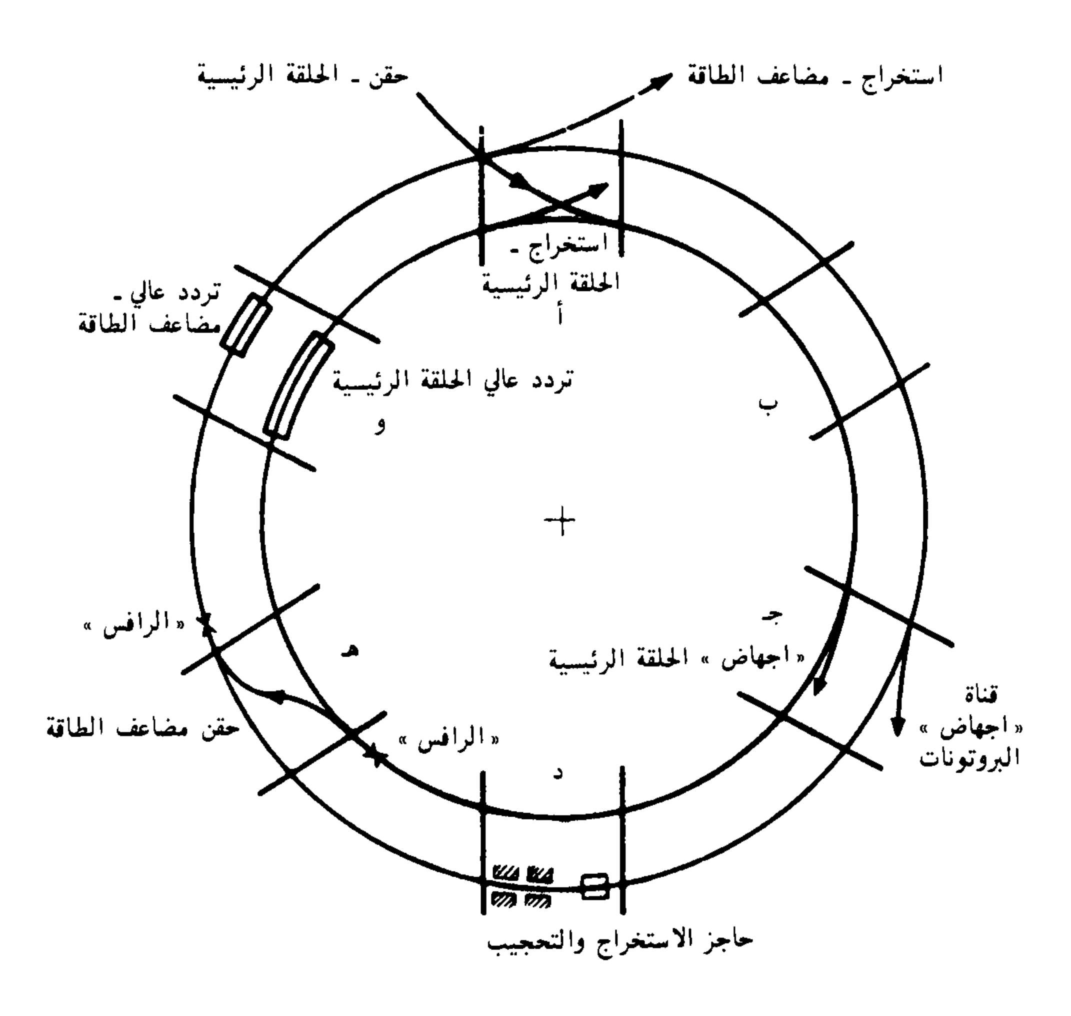
المراجع

(أ) Private Communication from P.V. Livdahl, Directors Office. on Dec 20, 1979 Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, III, U.S.A.

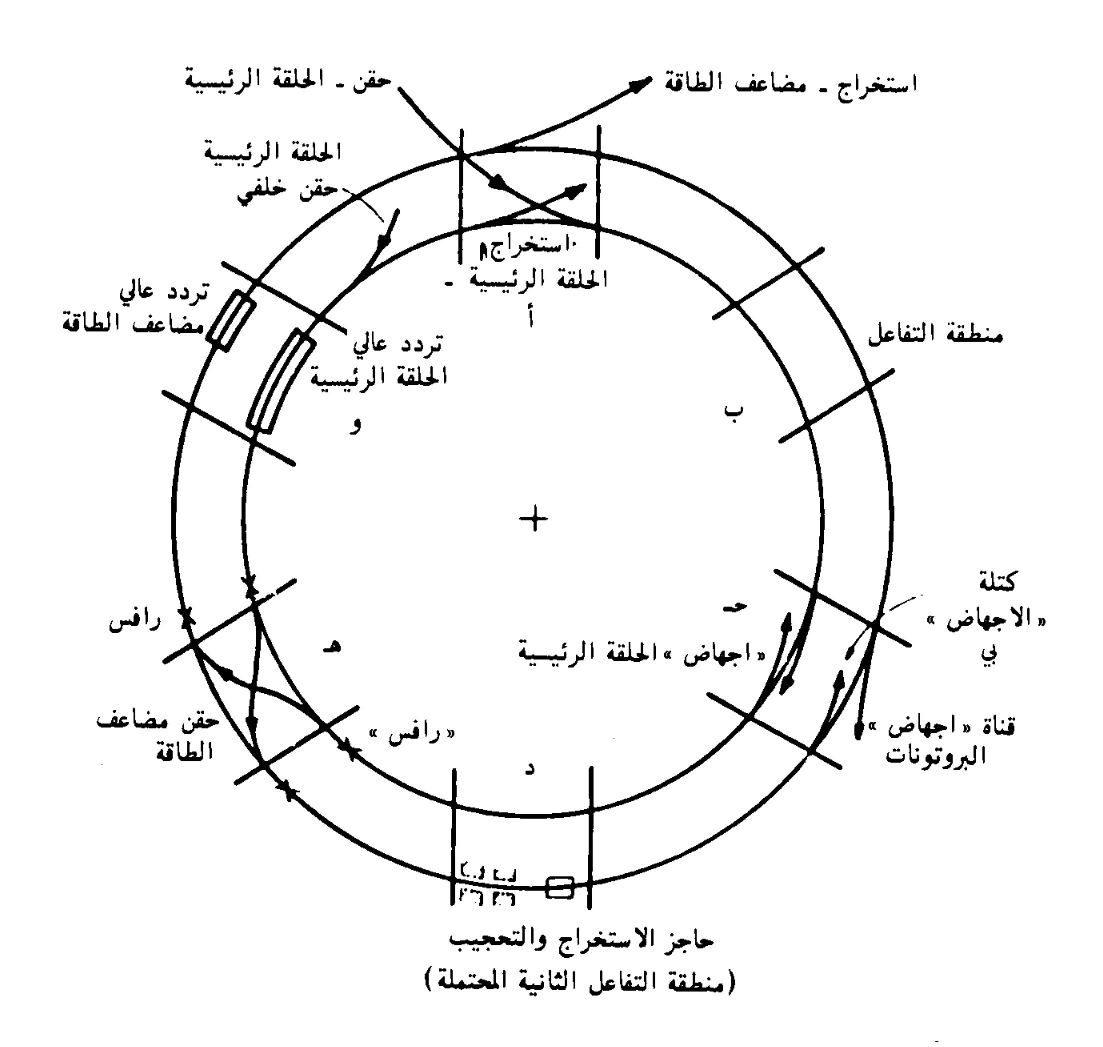
(ب) F.T. Cole, M.R. Donaldson, D.A. Edwards, H.T. Edwards, and P.M. Koehler (as Editors of:-) A Report on The Design of the Fermi National Accelerator Laboratory Superconducting Accelerator, May 1979.



شكل (١ ـ ١) مقطع نفق المعجل



شكل (١ ـ ٢) استخدام المقاطع الستة الطويلة المستقيمة في شكل الهدف الثابت



شكل (١ ـ ٣) استخدام المقاطع الستة الطويلة المستقيمة في شكل الحزم المتصادمة

الباب الثاني

تطبيقات معجلات الجسيمات

مقدمة :

إن معجلات الجسيمات ذات الطاقة العالية والكثافة الكبيرة قد فتحت مجالات عديدة للبحث كان الكشف عنها في السابق يتم بمصادر للاشعاع النووي أقل طاقة وأصغر كثافة. وكلما تقدمت تقنية المعجلات بما يزيد طاقة الحزم الأيونية المتاحة بالطريقة التي شرحت في الباب الأول، تزايدت مجالات تطبيقات المعجلات وصار مغزاها أعظم وأكثر أهمية. ولقد كان الاستخدام الأول للمعجلات فحص العمليات الأساسية والظواهر بتفصيلات أعظم بكثير مستخدمين خواص التحكم في الطاقة والتناسق فضلا عن الانفراج الصغير للحزمة. لعل الهدف الرئيسي لمعجلات الجسيمات كان استخدامها في فيزياء الجسيمات الأولية، أي الكشف عن عالم ما تحت الذرة. وفي هذا الشأن لا يكون البحث مرتبطاً بأي نظرة في اتجاه التطبيق المفيد، ولكن بالسعي وراء الاكتشافات بغرض الاكتشافات وحدها. ويقتضي الأمر مجهودات قرون عديدة حتى نفهم الكون الذي نعيش فيه. فالجسيمات الأولية هي الجسيمات الأساسية التي يبدو أن كوننا بأسره يتكون من تفاعلاتها وانضماماتها، وان التغير في معناها انما يعكس صورة تاريخ الفيزياء الحديثة. وعليه، ففي زمن « نيوتن » كان يتواجد جسيمات أولية بالكثرة التي تتواجد بها أنواع المادة

(الماء ، الملح ، الاكسيجين ، الحديد ، . . . .) . وفي القرن التاسع عشر تسبب الكشف عن التركيب الدقيق للمادة في اكتشاف أن كل المواد بكل أنواع جزئياتها المختلفة تتركب من ١٠٠ نوع من الذرات . وقد صارت هذه الأنواع الجسيمات الأولية للقرن الأخير كما أنها عملت الجدول الدوري . ثم كان لدينا النظرة الأولى داخل الذرة قبل الحرب العالمية الأولى . فقد ظهرت كقلب غاية في الصغر ، النواة ، محاطة بواحدة أو أكثر من الالكترونات التي تمكن تشكيلها من تعيين الخواص الكيميائية للذرة . ومنذ أكثر من عقدين من الزمن انشقت الأنوية ذاتها منفتحة ، ووجدت الأنوية تتكون من بروتونات ونيوترونات . ولم تكن بذلك المائة ذرة هي الجسيمات الأولية للكون ، بل كانت تتركب من أنواع قليلة جداً : البروتونات والنيوترونات والالكترونات . وينبغي أن نضيف لذلك موجة الضوء . لقد كان لها مسميات أخرى في زمننا : الاشعاع الكهرمغناطيسي ، الأشعة السينية ، أشعة جاما ، الكم ، الفوتون ، وكل منها اما أن يُعامل كموجة أو كجسيم وكان نصراً للفيزياء الحديثة أن نفهم هذه الازدواجية ليس لسلوك الضوء فحسب بل ولكل الجسيمات ، وعليه فان ما نتعارف على ترقيمه كجسيمات له خواص الموجات ، وبالعكس تكون موجة الضوء جسيماً أولياً بنفس القدر الذي يكون عليه الالكترون أو البروتون أو النيوترون . ولكن النظرة بأن هذه الجسيمات الأربعة قد تكون الجسيمات الأولية للكون الذي نعيش فيه قد تحطمت تماماً . ذلك أن التقدم الباهر في الفهم النظري وفي الأساليب الفنية التجريبية قد كشف عن حقيقة أن مظهر الكون ليس على وجه التقريب بهذه البساطة . فهناك العديد من الجسيمات الأولية ، عندما نُظِر اليها بالمحطمات الذرية التي تستطيع أن تحلل التفصيلات الدقيقة بطريقة غير عادية ، كشفت عن تركيب «تحتي» منطو على « مُضيف » لجسيمات جديدة وغريبة كما رأينا في الباب الأول . لذلك فانه بفضل ماكينات الطاقة الفائقة الارتفاع كانت الجسيمات الأولية وفيزياء الطاقة العالية تمثل واحدة من

التطبيقات الرئيسية للمعجلات. وتعتبر الفيزياء النووية بصفة عامة مجالاً ذا أهمية عظمى كأساس لتفهم الظواهر الكثيرة التي جعلت استخدام المعجلات ممكناً في مجالات متعددة ترتبط بخطط الانماء (الصناعية والزراعية والطبية والهندسية، ...)، كما سنشرح فيما يلي.

٢أ البحث النووي وفيزياء الطاقة العالية

سيكون من المستحيل أن نعدد ولو مجرد رؤوس الموضوعات في مجال بحوث الفيزياء النووية المستخدمة لمعجلات الجسيمات. ولقد اعتمد التقدم الذي أُحرز في هذا الشأن على عدة عوامل مثل: طاقة الحزمة (منخفضة، متوسطة، مرتفعة، أو فائقة الارتفاع)، شدة كثافة الحزمة، وما اذا كانت الحزمة مستمرة أو نابضة، ثم نوع الجسيمات المستخدمة (أيونات فردية الشحنة، متعددة الشحنة، خفيفة أو ثقيلة). وسنكتفي باعطاء أمثلة هنا لخطوط البحث الرئيسية.

البحث النووي في مدى ١٠ الى ١٥٠ مإف

في هذا المدى للطاقة تتعلق المسائل المركزية للفيزياء النووية بتفاصيل التركيب النووي. وتوجد هذه الأيام نماذج نووية عديدة تشرح الظواهر التجريبية، ولقد كانت الحزم الأيونية الكثيفة ذات فائدة كبرى في حسم هذه النماذج المختلفة.

الفيزياء الضوء نووية (Photo - Nuclear):

يستخدم هذا المجال الأشعة السينية المنتجة بواسطة حزم الالكترونات ذات الطاقة العالية. والى عهد قريب كان اهتمام الفيزياء الضوء نووية منصباً على نظاميات العمليات، كقياس مقطع الامتصاص للأشعة السينية بدلالة «الماص» والطاقة. ولقد كشفت هذه القياسات «الرنينات العملاقة» الضوء

نووية التي أعطت نظرة متعمقة مميزة في العملية الضوء نووية ، وأوضحت كونها قابلة للشرح بدلالة النماذج النووية التي انبثقت من فروع أخرى للفيزياء النووية. ولقد أنجز عمل كثير على تفصيلات هذه العملية. وبالاضافة الى تحسينات المعجلات المتاحة الآن ، أصبح من المستطاع استغلال عدد من الأساليب الفنية للتجارب الدقيقة وطرق الكشف ، متضمنة قياسات « زمن الطيران » بالواحد على ألف مليون من الثانية ، وتلاشى البوزيترونات الوحيدة الطاقة وكاشفات الجوامد.

ويلاحظ أن المعجل الخطي القوي المناسب بالاشتراك مع الأجهزة المساعدة يمكن أن يكون عظيم الفائدة لقياس الاطياف الضوء نووية المفصلة وذلك بالنسبة الى توزيع الطاقة والتوزيع الزاويّ ، واستقطاب الجسيمات المنبعثة وذلك بدلالة طاقة الفوتون الساقط. ويمكن اجراء هذه التجارب بدقة عالية باستخدام وسيلة « زمن الطيران ». وتعتبر حزم الالكترونات العالية الكثافة حيوية لتحليل المعلومات وعلى الأخص في تشتيت الجسيمات المنبعثة من أهداف الاستقطاب الحساسة.

القوى النووية:

لقد أجريت فحوص مفصلة بواسطة تجارب التشتت النووي بالالكترونات وأشعة جاما والنيوترونات الضوئية. وبدراسة حدود الانتاج (production thresholds) والرنينات للتفاعلات المختلفة يمكن الحصول على معلومات عن المستويات النووية لطاقة الترابط.

ومن خلال نظام ما يعرف بوضع « التلاشي في الطيران » (position annihilation_in_flight)، يمكن استخدام مصدر كثيف لأشعة جاما الوحيدة الضوء الممكن التحكم في طاقتها في هذه المجهودات البحثية الهامة. وتنتج الحزمة القوية للالكترونات من معجل خطي بوزيترونات في هدف « الدش »

(«shower» target) . ويكون لهذه الجسيمات طيف عريض للطاقة على أنها يمكن أن تُحلل بالنسبة لكمية الحركة في مغناطيس حارف قبل الاصطدام بهدف التلاشي ، مع ملاحظة أن اختيار طاقة أشعة جاما يمكن انجازه بتغيير المجال المغناطيسي . على أنه نظراً لان كفاءة التحول من كثافة الالكترونات الأصلية الى كثافة جاما الموحدة الطاقة تكون صغيرة جداً ، لذلك يجري تخطيطها ، بما في ذلك تطوير معجلات قادرة على انتاج جسيمات مشحونة موجبة وسالبة ، كما في السينكروترون بمدى طاقة المليون ڤلط الكتروني . ونجد في المطبوعات العلمية عدداً غير محدود من البحوث المنشورة ، كما يوجد في مؤتمرات بحوث الفيزياء النووية مئات من البحوث المقدمة لمعالجة هذه المشاكل .

فيزياء الطاقة العالية والجسيمات الأولية :

ان الأدوات الأساسية للفيزيائي الذي يبحث في عالم ما « تحت » الذرة هي حزم الجسيمات ذات الطاقة العالية التي تشبه الحزم الضوئية في المجاهر الالكترونية ، وكذلك الأجهزة المختلفة لكشف هذه الجسيمات وهي الأجهزة التي تمثل عيون الفيزيائي .

ان جسيمات الطاقة العالية تتواجد في الأشعة الكونية ، غير أن هذه نادرة الحدوث ولا يمكن التحكم فيها . ويتوقف فهمنا للتركيب النهائي للمادة والطاقة على الحزمة التي تأتي من محطمات الذرة التي « ترى » الى المسافات التي تكون بالنسبة لسمك صفحة من الورق مثلما يكون هذا السمك بالنسبة للمسافة الى القمر .

ولقد أنجز في العقد الماضي تقدم باهر في مجال فزياء الجسيمات الأولية ، وبالرغم من أن بحوث الأشعة الكونية حقق مساهمات مبكرة هامة إلا أن تقدماً أكثر قد نتج حديثاً وذلك بصفة أولية من استخدام معجلات الطاقة العالية . وخلال الدراسات التي أجريت على هذه الماكينات اكتشف أن

الجسيمات تتواجد في أكثر من مائة حالة مختلفة ، العديد منها قصير العمر جداً . وبالنسبة لمعظم الحالات المعروفة للجسيمات قيست الخواص الأساسية مثل الشحنة والكتلة واللولبية وزمن العمر . ومن الواضح أن هذه الحالات ليست جميعها أولية في « ذاتها » ، وقد كان التحدي الأساسي في أن نجد أنماط ذات نظام في سلوكها . وتم استكشاف التركيب الكهربي للبروتون والنيوترون ، والاستدلال عليه بالنسبة للجسيمات الأخرى .

ان جميع الظواهر الطبيعية المعروفة الآن يمكن أن تُنسب الى أربعة أنواع أساسية للقوة هي : الجاذبية ، الكهرمغناطيسية ، « التفاعلات القوية » المسئولة عن طاقة الترابط النووية ، « والتفاعلات الضعيفة » التي تسبب أشكالاً معينة للفاعلية الاشعاعية . وحوالي عام ١٩٥٠[1] اكتشف الفيزيائيون فصيلة جديدة من الجسيمات « الغريبة » التي تتحلل أبطأ كثيراً مما كان متوقعاً . ويذكر هنا أن قانون « الحفاظ على الغرابة » (conservation of strangeness) الذي اقترح لأول مرة في عام ١٩٥٣ ، يعطي تصنيفاً للتفاعلات القوية والضعيفة للجسيمات ، ويفسر معدل انحلال الجسيم الغريب . ولقد تأكد هذا القانون بتجارب كثيرة في المعجلات المتعددة البليون ڤلط الكتروني .

هذا ولقد تحقق المبدأ النظري الأساسي للتماثل (symmetry) بين الجسيمات و« مضاد الجسيمات » وذلك باكتشاف مضاد البروتون (antiproton) في البيفاترون عام ١٩٥٥ ، وهو يماثل البروتون ولكنه ذو شحنة كهربية مضادة . وتستطيع البروتونات ومضاداتها أن تتلاشى تبادلياً ، وهي العملية التي تحرر طاقة البليونين من القلط الالكتروني المتمثلة في كتلاتها . وتوجد كذلك « مضادات الجسيمات » للجسيمات الأخرى . ومن الجلي أنه طبقاً للنظرية فان لكل شيء مكون من مادة عادية يمكن أن يتواجد شيء متناظر مكون من مادة مضادة . وفي كل مكان من الكون يمكن أن توجد مجرات كاملة مكونة من « مضادات المادة » .

ولقد أثير تساؤل فيما بعد خلال تجارب المعجلات على واحدة من الجسيمات الغريبة، «ميزون كي - (K-meson)، أمكن الاجابة عليه باقتراح أن عوالم الجسيمات ومضادات الجسيمات هي صور مرآة لبعضها البعض. وتميز القوانين الأساسية للطبيعة بين اليمين واليسار؛ وعلى الأخص فان الأحداث التي تظهر «يسارية اليد» (left handedness) بالنسبة لجسيمات ما تظهر في نفس الوقت «يمينية اليد» (right handedness) بالنسبة لمضادات هذه الجسيمات. وكانت عواقب هذه النتيجة المدهشة(المسماة «عدم الاحتفاظ بالتماثل» (nonconservation of parity في التفاعلات الضعيفة) قد أثرت على عدة فروع من الفيزياء، فتحسن كثيراً التفهم النظري للتفاعلات الضعيفة، ولدينا الآن لأول مرة فهم جيد بدرجة معقولة للنوع المحير من الفاعلية الاشعاعية التي ينتج منها أشعة بيتا. وعلاوة على ذلك فاننا نعرف أن كل الجسيمات تقريباً التي تنتج في الانحلال الضعيف انما تتلولب حول اتجاه حركتها.

على أن تطوير المعجلات الجديدة في الخمسينات، بالاضافة الى ابتكار آلات جديدة لتحليل التفاعلات بين الجسيمات، قد أدى الى اكتشافات أخرى خلال أواخر الخمسينات وأوائل الستينات. ووجدت حالات جديدة للجسيمات (تسمى الرنينات resonances) التي تتحلل فورياً على وجه التقريب وذلك في كل من «الكوزموترون» في «بروك هافن» وفي «البيفاترون» في بيركلي باستخدام غرف الفقاعة الكبيرة جداً. وقد انطوى اكتشاف هذه الأحداث على دراسة دقيقة لآلاف الصور الفوتوغرافية، كما تطلبت ساعات من الزمن على الحاسبات الآلية (الكومبيوترز) الترقيمية ذات السرعة العالية. كما أن دراسات الحالات الجديدة ذات العمر القصير قد حفزت التطويرات النظرية التي تعطي أملا لفهم حيوي للتفاعلات القوية ولخواص الجسيمات التي تحملها. وربط مبدأ جديد فيما بين الجسيمات ذات الشحنة الكهربية المتماثلة وبلولبية مختلفة، كما ربط مبدأ آخر فيما بين الجسيمات المختلفة الشحنة ولكن بنفس

اللولبية. وكذلك أعطى المبدأ الثاني توقعات لسلوك الاحتمالات المشتتة عند الطاقات التي تتجاوز مدى معجلات الخمسينات. وهناك اكتشاف آخر غير عادي تم في أوائل الستينات باستخدام سينكروترون بروك هافن. ٣٣ ـ ب إف، ذي الميل المتردد، أعظم المعجلات قوة التي كانت تعمل في ذلك الوقت. ذلك أن أحد الجسيمات الأولية الأكثر مراوغة وهو « النيوترينو »؛ الجسيم الذي ليس له كتلة سكون ولا شحنة كهربية. وينتج النيوتروينو عندما تنبعث أشعة بيتا من ذرات ذات نشاط اشعاعي، وكذلك عندما تتحلل « الباي ـ ميزون » (المسمى باللاصق النووي) الى ميون (muon). وباستخدام « غرفة الشرارة » (كجهاز كشف) اثبت أن النيوترينوات التي تنتج بهاتين العمليتين هي جسيمات مختلفة، كما كانت توقعات النظريين لعدة سنوات. على أن المشكلة الرئيسية في ذلك الوقت كانت ايجاد المبدأ العام لكل من التفاعلات القوية والضعيفة. ومن أجل هذا الغرض، وحتى يمكن اكتشاف المزيد من الجسيمات الغريبة، بُنيت محطمات ذرية في مدى مئات البليون قلط الكتروني في « سيرن » وفي « فيرمي لاب » كما ذكر في الباب السابق. ففي المحطم الذري « ٥٠٠ ـ ب إف » بفيرمي لاب تم مزيد من اكتشافات الجسيمات الغريبة. ومن تلك الاكتشافات كانت « الكواركس » و« الليبتونز »، و« الباريون » الفاتن، وغيرها. ولعل أكثر هذه الاكتشافات اثارة هو الاكتشاف الحديث (في مايو ١٩٧٧) لجسيم غريب أعطى اسم أبسليون (γ). فقد وجدت كتلته ـ بما يثير الدهشة ـ تزيد عن عشر مرات كتلة البروتون[٢]، وهي بذلك أثقل الجسيمات « تحت النووية » التي تم اكتشافها على الاطلاق.

ويعتبر « الابسيلون » أثقل أربع مرات من الجسيم المكتشف في عام ١٩٧٦ والذي يشار اليه « بالباريون الفاتن » (charmed baryon)، وقد صار مثلا لما يسمى « الفتنة العارية » (naked charm) التي أكدت صحة الكثير من التخمين عن « الكواركس الفاتنة ».

فلقد كان التخمين في مجال فيزياء الطاقة العالية لبعض الوقت أن كل المادة تتكون من تركيبات من مجرد اثنين من « الكواركس » ، أحدهما يسمى الكوارك الفوقي والآخر الكوارك التحتي . والبروتون هو اثنان من الكواركس الفوقي وواحد تحتي ، بينما يكون النيوترون اثنين تحتيين وواحداً فوقياً . وحتى الميزونات تكون أبسط ؛ انها مجرد اثنان من الكواركس في تركيبات متعددة .

غير أن المادة أكثر مكراً من ذلك ، وبعض الجسيمات « النادرة الرؤية » والتي تبقى أقل من عشرة أجزاء من المليون للثانية يكون لديها واحد من الكواركس الشائعة مستبدلاً بكوارك ثالث ، يسمى الكوارك الغريب . وقد ظهر كوارك رابع في عام ١٩٧٤ ؛ سمي الكوارك « الفاتن » واكتشف في نفس الوقت بمعمل بروك هافن القومي ومركز بحوث المعجل الخطي في ستانفورد . على أن العديد من المساهمات الهامة للمعرفة عن « الفتنة » قد أنجزت في فيرمي لاب ، وقد كان أحد هذه المساهمات اكتشاف الباريون « الفاتن » الذي ذكر آنفاً .

والآن يبدو أن « كواركا » خامساً ، وهو باعث على الحيرة أكثر من غيره ، قد نتج من هذا الاكتشاف الجديد . انه يعتمد على الفحوص والدراسات الجارية .

ان النية لانجاز هذا الاكتشاف ترجع الى عام ١٩٧٠ ، ثم في عام ١٩٧٧ ، انبرت مجموعة البحوث لدراسة الأحداث النادرة التي تظهر عندما ينتج زوج من الميونات أو الالكترونات في تصادم حزمة البروتونات من المعجل على هدف البلاتين . ولقد تطلب البحث عن هذا التفاعل الفذ استخدام أدق « المرشحات » لمنع كل تفاعل آخر . وهنا ينتج أبسيلون واحد لكل مائة بليون بروتون تضرب الهدف ، ويجب على التجارب أن تحوز على هذا الحدث المفرد .

وحتى الآن لوحظ ألف أبسيلون. وفي نفس الوقت فان المنافسة حادة بين العلماء في مختلف انحاء العالم وتستمر الاكتشافات الجديدة في تقدمها.

٢ ب اختبار المواد النووية وتوليد المواد الانشطارية

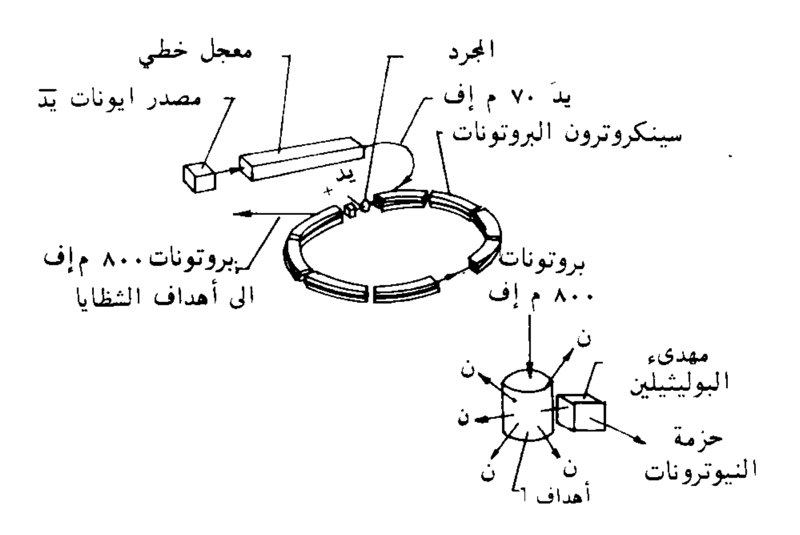
اختبار المواد باستخدام النيوترونات من معجلات الطاقة المنخفضة:

يستخدم الآن في المعجلات عدة تطبيقات مماثلة لتطبيقات مفاعلات الانشطار وفي هذه الحالة تكون الميزة بالنسبة للمعجلات أنها أجهزة أقل تعقيداً، بالاضافة الى أنها أبسط في التشغيل والصيانة. وتتضمن مثل هذه التطبيقات اختبار المواد النووية باستخدام النيوترونات المتولدة من معجلات الطاقة المنخفضة. وكمثل لذلك ،استخدام معجل فان دي جراف ٣ - م إف[٣] في تحليل غير تخريبي للمواد الانشطارية مثل يو ٢٣٥. وهنا تتداخل عينات صغيرة من المادة مع نيوترونات ٣٠٠ الى ٦٠٠ ك إف ناتجة عن تصادم بروتونات ٢٫٣٥ م إف مع أهداف ليثيوم سمكها ٢ ملي جرام/سم٢، ثم يقاس عطاء النيوترونات «المتأخرة» (delayed - neutrons) من الانشطار الحادث في العينة، فهي تمثل ٠٫٦٪ من النيوترونات المنبعثة في الانشطار. وينطوي الأسلوب الفني على الاصطدام المتكرر للعينات في دورات تحتوي على نبضة نيوترونية مداها ٣٥ ملي ثانية، يتبعها فترة «انتظار» طولها ١٥ ملي ثانية. ولقد توضح أنه اذا شُغلت دورة تصادم النيوترون لفترة طويلة بالنسبة الى أطول عمر نصفي لمجموعات النيوترونات المتأخرة (التي يكون لها أعمار نصفية تبدأ من ٠٫١ الى ٥٦ ثانية) فيكون العطاء من النيوترونات المتأخرة غير متوقف على وفرة مجموعة النيوترون المتأخر والعمر النصفي، وأنه يتناسب فقط مع كمية المادة الانشطارية المتواجدة في الفيض النيوتروني المتداخل، ومع مقطع الانشطار المتكامل على مدى الطيف النيوتروني، والعطاء المطلق للنيوترونات المتأخرة لكل انشطار. على أن الكمية الأخيرة تكون ثابتة للنظير

المعطى والمتواجد في المنطقة ذات الاهتام لطاقة النيوترونات.

استخدام معجلات الطاقة العالية كمصادر للفيض النيوتروني الكثيف:

ان الاتجاه الجديد في الوقت الحاضر لمعجلات الطاقة العالية، وعلى الأخص السينكروترونات بطاقة حوالي واحد ب إف، يتمثل في صدم هدف بحزمة من البروتونات أو الديوترونات ذات الطاقة العالية حتى تنتج نيوترونات « الشظايا » (spallation neutrons) ذات الفيض الذي يزيد كثيراً عن فيض مفاعلات « الحالة المستقرة ». وتعتبر التطبيقات في هذا المجال حيوية، فهناك مجموعات من الباحثين يجرون عملاً مكثفاً من أجل استغلال فيض الشظايا العالي للحصول على مدى واسع وغني من الاثارة الناتجة عن تشتت النيوترونات وبما يشتمل على امكانات كاملة. أو ما يعتبر على أنه ذو أهمية أكبر أن يستخدم المعجل ـ المولد كوسيلة لحل مشاكل الطاقة. ففي الحالة الأولى نرى مصدر نيوترونات نابض وذا شدة عالية ـ مقترحاً في معمل أرجون القومي(٤) ـ يستخدم مصدر أيونات سالبة لحقن الأيونات في معجل خطي ليعجل الأيونات الى ٧٠ م إف، ثم تنزع الالكترونات من الأيونات السالبة لتحول الى بروتونات يتم تعجيلها في سينكروترون عالي الكثافة حيث تخرج البروتونات بطاقة قدرها ٨٠٠ م إف (شكل ٢ ب ١). وتنبثق البروتونات في طلقات بمعدل ٥×١٠^١٣ بروتون للطلقة الواحدة كل ١٦٫٧ ملي ثانية عند الحقن. وتُحول هذه الحزمة بالتناوب الى هدف اليورانيوم من أجل دراسات التشتت النيوتروني، ويعطي كل نيوترون ساقط على الهدف حوالي ٣٠ نيوترون سريع بالتناثر عند هذه الطاقة. ثم تُبطّأ النيوترونات في مهدىء ايدروجيني بما يؤدي الى قمة فعالة لفيض نيوتروني حراري بحوالي ١٠^١٦ نيوترون/سم^٢ ثانية. ويتحدد اتساع نبضة النيوترون بصفة أولية بواسطة زمن الابطاء، ويكون بقدر ١٠ ميكروثانية في المدى الحراري. والسمة الشديدة الأهمية لمثل هذا



شكل ٢ ب ١ رسم تخطيطي لمصدر نيوترونات نابض كثيف.

المصدر النابض هي أنه سيكون لدينا كذلك مصدر منتج للنيوترونات فوق الحرارية (>١ر. ڤلط الكتروني) بوفرة إضافةً الى الفيض الحراري البالغ الارتفاع. وستكون هذه النيوترونات الأعلى طاقة بالغة النفع لتشكيلة واسعة من التجارب.

ويجدر بالذكر أنه توجد أربعة خواص عامة لمصدر النيوترونات النابض والكثيف والتي أدت حديثاً الى الحماس الشديد بين العلماء المهتمين ببحوث المادة المكثفة:

(١) كثافة بالغة الشدة خلال مدى الطاقة الحرارية.
(٢) فيض عال للنيوترونات الفوق حرارية (>١٠ر. ڤلط الكتروني).
(٣) الطبيعة النابضة للمصدر.
(٤) يمكن أن يُهيأ المهدىء لانتاج حزمة كثيفة من النيوترونات « الباردة » أو « الحارة ».

ولقد تطور تشتت النيوترونات الحرارية ليصير واحداً من أعظم الأساليب الفنية التجريبية العامة لبحوث المادة المكثفة. ففي العديد من الاحالات تُعطى معرفة ميكروسكوبية مباشرة ليست سهلة المنال بأي وسيلة فنية أخرى، وفي حالات أخرى كثيرة تعطى نتائج تكون متممة بشكل مكتمل للمعلومات التي يمكن الحصول عليها من وسائل القياس الفيزيائية الأخرى. وقد تدعمت جيداً - كما نَمتْ باستمرار - التطبيقات التي تمتد الى علوم الأحياء والكيمياء والفيزياء وعلوم المواد.

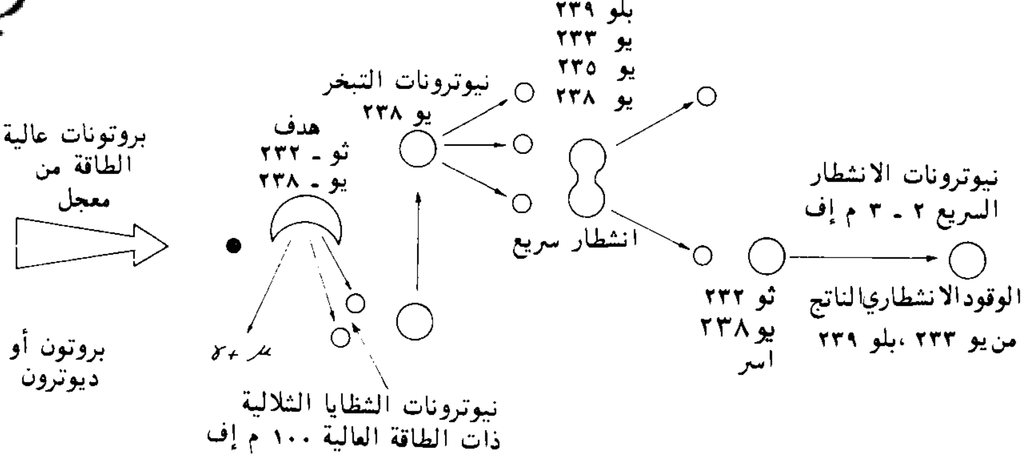
وجدير بالاهتمام ان نشير عند هذه النقطة الى مصنع الترانسيورانيوم في بيرلينجتون(٥) والذي يتكون من معجل فان دي جراف الترادفي (نوع تي يو TU) يتصل على التوالي مع، ويحقن حزمة أيوناته في معجل ترادفي آخر (نوع إم بي MP) لينتج ڤلطية قدرها + ٢٠ مليون ڤلط على طرف المعجل الأول و١٦ مليون ڤلط على طرف المعجل الثاني من أجل تعجيل جميع الأيونات من الجدول الدوري الى طاقات حركية تزيد عن «حاجز كولوم» (Coulomb barrier) لنواة اليورانيوم. وفي هذا المركب يمكن أن تُدفَع أيونات اليورانيوم الى طاقة ١٫٣ ب إف وهي الطاقة المطلوبة لأول تصادم محكوم لنواتين من اليورانيوم وهو التفاعل النووي الأقصى بين العناصر التي تتواجد طبيعياً. وتبين الدراسات النظرية أن أياً من العنصرين «س٢٩٨» أو «س٣١٠» سوف تكون نواته «مزدوجة السحرية» ذات عمر نصفي طويل بالقدر الذي يمكن ملاحظته وقد يصل الى ما قيمته عشر سنوات. وهذه العناصر تأتي نظرياً من «جزيرة» للاستقرار بعيدة خلف نهاية الجدول الدوري الذي تم تمديده الى عنصر الكيرشاتوفيوم كير٢٦٠ بواسطة المجموعة السوفييتية باستخدام معجل «دبنا». وتعتبر تجارب التفاعلات النووية التي تخلق هذه العناصر «الفوق - ثقيلة» ممكنة بمعجلات «إم. بي - إكس تي يو» التي بنيت بواسطة شركة هندسة القلطية العالية (هاي فولتيج انجينيرنج).

معجل التوالد (Accelerator Breeder):

إن التكاليف المتزايدة لليورانيوم - ٢٣٥ ولأنواع الوقود الانشطارية الأخرى والجدول الزمني لتنفيذ مفاعل التوالد قد جددت الاهتمام باستخدام المعجلات لتوليد يورانيوم - ٢٣٣ أو بلوتونيوم - ٢٣٩. ويمكن أن تستخدم فكرة تحويل المواد الخصبة الى وقود نووي بتحويل ثو - ٢٣٢ الى يو - ٢٣٣، أو يو - ٢٣٨ الى بلو - ٢٣٩ باستغلال نيوترونات «الشظايا» المنتجة بواسطة معجل عالي الطاقة، بروتونات أو ديوترونات من ١ الى ٢ ب إف مثلاً مع الهدف المناسب.

وتشير التقديرات إلى أنه بالسعر الحالي وقدره ٤٠ دولاراً للرطل من يو$_٣$ أ$_٨$ تكون تكلفة يو - ٢٣٥ حوالي ٣٠ دولاراً للجرام. كما تبين التقديرات الأولية لتكلفة الوقود المولد في المعجل أنه يكلف ١٠٠ الى ٢٠٠ دولار للجرام الأمر الذي لا يجعله منافساً. ومع ذلك فالمعجل المولد يمكن أن يُرى ما اذا كان مرغوباً للغاية أو أنه غير اقتصادي على الاطلاق - وذلك يتوقف على الافتراضات التي تعمل على التكلفة المستقبلة.

ويجدر بالذكر أن اقتراحاً قُدم لمتغيرات المعجل وللاختيارات التي تعمل من أجل مواجهة المتطلبات الفنية والاقتصادية لمثل هذه الامكانية[٦]. ويوضح شكل ٢ ب ٢ تخطيطياً العمليات الأساسية لتوليد المعجل. هنا يوجه البروتون أو الديوترون المعجل الى طاقة عالية (١ ب إف مثلاً) نحو الهدف الصحيح. وتنتج التفاعلات مع أنوية الهدف عدة جسيمات ثانوية في تعاقب بانتاج نهائي لأي عدد من النيوترونات بين ٤٠ و٦٠ نيوترون. والواقع أن المعلومات المتاحة عن انتاج نيوترونات «الشظايا» تبين أن طاقة البروتون ينبغي أن تكون (ب إف أو أكثر) لتحقيق انتاج كاف من النيوترونات. ولو أننا اعتبرنا هدفاً/دثاراً للثوريوم ٢٣٢ أو يو - ٢٣٨ فان معظم النيوترونات ستؤثر منتجة يو - ٢٣٣ أو بلو - ٢٣٩. ويؤدي وجود هذه المادة الانشطارية



شكل ٢ ب ٢ التفاعلات النووية الناتجة بمعجل التوالد.

والانشطار السريع ليورانيوم - ٢٣٨ الى مضاعفة نيوترونات اضافية في الدثّار. ولذلك فان صافي الوقود المنتج هكذا يعطي بأسر التوالد ناقصاً انشطار الوقود المولد.

لذلك فان معجل التوليد المصمم بطاقة ١ ب إف و٣٠٠ ملي أمبير لحزمة البروتونات الموجهة الى هدف الثوريوم أو اليورانيوم المستنفذ يمكن أن تنتج أكثر من ١٠٠٠ كجم في السنة من وقود يو - ٢٣٣ أو بلو - ٢٣٩ ، وهذا بمقدوره أن يزود وقوداً كافياً لتأمين زاد لمفاعل عادي قدره ٣٠٠٠ الى ٦٠٠٠ ميجاوات كهرباء بما يتوقف على دورة الوقود ونوع المفاعل المختار. وبالاضافة الى انتاج الوقود تتحول قدرة حزمة البروتونات الأولية والتي تقدر في هذه الحالة بثلاثمائة ميجاوات (١ ب إف × $١٠^{٩}$ × ٣٠٠ ملي أمبير × $١٠^{-٣}$) الى حرارة في الهدف. وتقدر هذه ، بالاضافة الى الحرارة الناتجة من النيوترونات التعاقبية ، بحوالي ١٢٠٠ ميجاوات حراري تكون في متناول اليد لاسترجاعها

من أجل انتاج طاقة كهربية التي يمكن بدورها أن تُغذّى خلفياً لتزويد المعجل بالقدرة اللازمة. لذلك فلو اقتربت كفاءة المعجل من ٥٠٪ لأمكن جعل العجز في صافي القدرة اللازمة لتشغيل المعدات صغيرة بالقدر المقبول. بل أنه يصير من الممكن انتاج فائض من صافي القدرة بتصميم مختلف لهدف ذي تكبير أعلى.

ويوضح الشكل ٢ ب ٣ التخطيطي امكانية لمعجل توليد نموذجي متضمن لدورة الوقود النووي الكاملة[٦]، هذا وتوجد خيارات أخرى لدورات الوقود النووي. على أن الاختيار النهائي للنظام يتوقف على التفضيل واختيار المتغيرات العديدة. ومع ذلك فان المعجل المولد يتركز في جميع الحالات حول القدرة على انتاج معجل قوي ذي كفاءة عالية، وذي طاقة عالية نسبياً (حوالي ١ ب إف) من أجل الحصول على مئات الميجاوات للحزمة المطلوبة.

بحوث فيزياء الجوامد (Solid State physics Research):

تتزايد أهمية تأثيرات الاشعاع على الجوامد، ليس فقط للمواد الانشائية، وانما لأشباه الموصلات كذلك. فقد استخدمت المعجلات الخطية بحزمة من الجسيمات المشحونة يمكن التحكم في خواصها وذلك في دراسة الازاحة الذرية في البللورات، وغرس الشوائب في التركيب الشبكي. أو استقرار أنظمة أشباه الموصلات في المجالات الاشعاعية.

٢ ج التطبيقات الصناعية

٢ ج ١ المعالجة الاشعاعية وصناعة الطلاء

يقدم الاشعاع المؤين ميزة البدء السريع للتفاعلات الكيميائية الجذرية والحرة داخل المواد المولفة (البوليمرية) دون اضافة حرارة أو مادة حفازة. ونظراً لأن توليد المتطرفات الحرة يكون بدلالة التعريض للاشعاع، كما أنه مضيف،

فان درجة « التليف » (Crosslinking) في بعض المواد المؤلفة يمكن ايقافها عند أي نقطة. وبعد ذلك تُواصل اذا أريد في وقت لاحق.

إن كلا من تشعيع جاما وتشعيع حزمة الالكترونات تستخدم. ويكون الفرق بينهما في معدل الجرعة والاختراق داخل المادة. فاشعاع جاما من كوبالت - ٦٠ على سبيل المثال يعتبر نفاذاً ويمكن معالجة منتوجات يصل سمكها الى قدم واحد أو اثنين. ويكون معدل المعالجة بطيئاً الى حد بعيد، متوقفاً على كمية الطاقة المطلوبة للتفاعل. ويمكن أن يتفاوت زمن التعريض بين عدة ساعات ويوم كامل.

ومن ناحية أخرى يستطيع اشعاع حزمة الالكترونات أن يخترق مسافات الى نصف بوصة. كما يمكن تشعيع منتوجات عند سرعات عالية للغاية وتزيد عن عدة الآف الأقدام المربعة في الدقيقة. ويمكن أن يوافق هذا النوع من الاشعاع عدة سرعات معالجة خطية متواجدة بحيث يمكن أن تدرج بسهولة أكبر أنظمة الانتاج المتواجدة. لذلك فان أكثر من ٩٠٪ من المنتوجات المشعَّة تستخدم اشعاع الالكترونات كمصدر طاقتها. هذا ويمكن فهم ميكانيكية المعالجة بالاشعاع الالكتروني لو أننا اعتبرنا ما يحدث عندما تُمتص الكترونات سريعة جداً في المادة. ففي هذه الحالة تنقل الطاقة الى الالكترونات المقيدة في الذرات والجزيئات بما يرفعها الى حالات أعلى من التهيج. وتستطيع الأيونات والمنشقات الحرة أن تبدىء التفاعلات الكيميائية داخل المادة المشعة، وهكذا تغير الخواص الفيزيائية للمادة.

٢ ج ٢ مجالات أخرى لتطبيقات حزم الالكترونات المعجلة

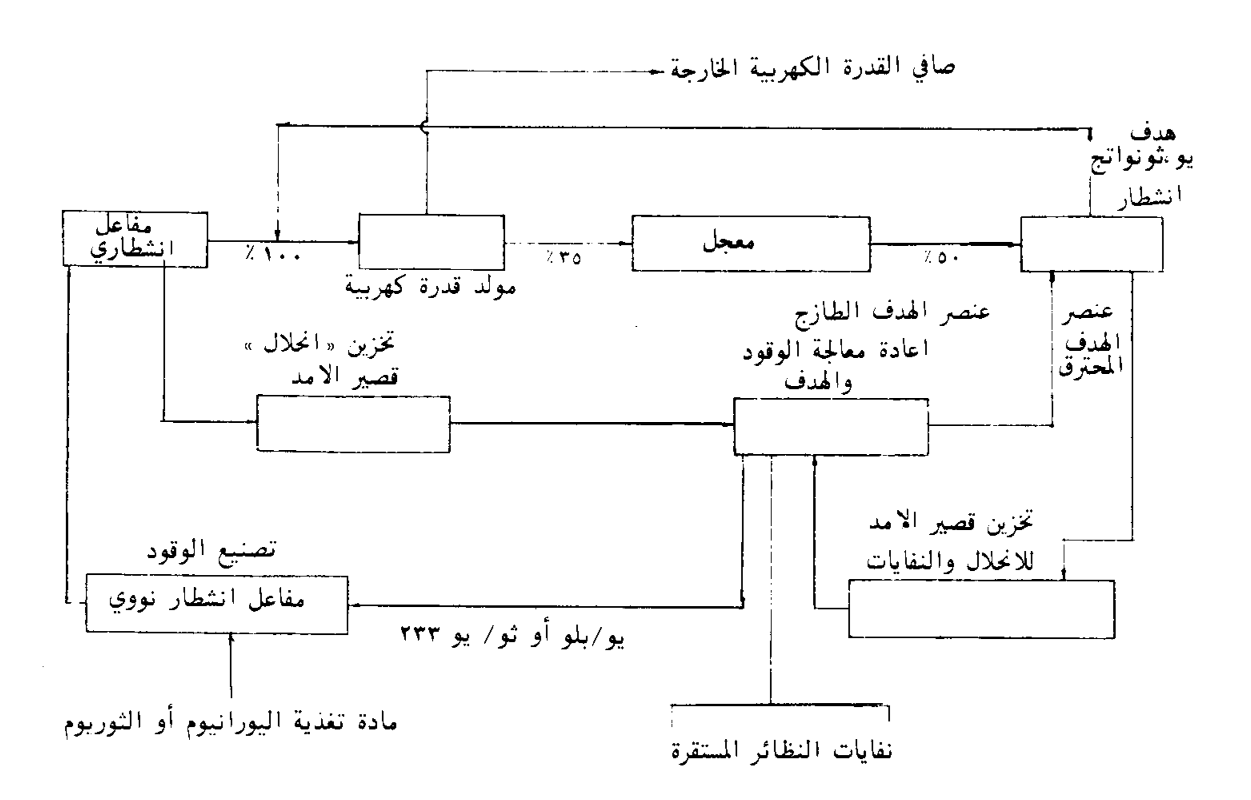
تستخدم معجلات الالكترونات في الوقت الحاضر في نطاق واسع كما يتم تشغيلها في مجالات التطبيقات التالية:

(١) يستطيع الاشعاع المؤين أن ينتج « التليف » والتطعيم (grafting) في

البلاستيك والمطاط ، والبوليوليفين « ولعزل الأسلاك والكابلات ، وهكذا يحسّن اجهاد التصدع ، والحك والمقاومة ودرجة الحرارة التي تعمل عندها المادة . وينطبق نفس الشيء على تليف رقائق البلاستك والأنابيب وكذلك المطاط الرغوي (foam) .

على أن تعديل المنسوجات بتطعيم كيماويات فوق مادة النسيج يُحسّن خواص مقاومتها للتلوث ومقدرتها على أن تصبغ . ومن المتوقع بدون شك أن يُعطى انتباه أكثر في المستقبل الى هذه العمليات المدخرة للطاقة . ويجدر بالذكر أنه بالنسبة لصناعة مواد التولف « السلولوز » نرى التطويرات في طريقها الى اعداد أقمشة معوّقة للحريق وأصناف جديدة من واقيات الأخشاب الغير مرشحة باستخدام اشعاع جاما أو الالكترونات .

(٢) وقاية الأطعمة : يمكن معالجة تشكيلة كبيرة من منتجات الأطعمة بنجاح وذلك باستخدام الاشعاع لاطالة عمر « حفظها على الرف » ، أو أنها تعقّم للتخزين الغير محدد . فالفواكه الطازجة والخضراوات واللحوم والسمك ، وهي أطعمة تتغير نكهتها وقيمتها الغذائية بالوقاية الحرارية والكيميائية ، يمكن أن تحافظ عليها جرعات منخفضة من الاشعاع دون التضحية بنوعية الانتاج . كما أن وقاية الأطعمة بالاشعاع هي الآن تحت الاعتبار النهائي بواسطة لجنة « كودكس » للتغذية التابعة لهيئتي « فاو » و« هو » (FAO & WHO) بالنسبة لعدد من أصناف الأغذية . وسيتركز العمل في المستقبل على ايجاد دلائل عن صلاحية الطريقة لأصناف أخرى من الأطعمة . ولكن هذه الدراسات ستكون ذات خاصية أكثر أساسية وتعالج تأثيرات الاشعاع على الأجزاء العامة للأغذية لاثبات أن تشعيع الغذاء من حيث أنه عملية قد أصبح مقبولاً الى مستوى معين للجرعة . وسيتركز مجهود أكثر على دراسات عملية واسعة المدى للجدوى التقنية والاقتصادية . وسيفحص نظام متكامل لوقاية الطعام يدمج المعالجة الحرارية والاشعاع[٧] .



شكل ٢ ب ٣ معجل مولد ، نظام قدرة لمفاعل ماء خفيف مع اعادة معالجة الوقود وادارة النفايات (مرجع رقم ٦).

(٣) معالجة النفايات الصلبة والمياه: ان تشعيع القمامة من أجل جعل هذه المواد العادمة متاحة كغذاء للحيوان هو أسلوب آخر مرجوّ. فمعالجة المجاري بالاشعاع يمكن أن يؤدي الى زيادة انتاج مادة للاسمدة غنية في المادة العضوية. ومن ناحية أخرى، يستخدم التعقيم الاشعاعي للتخلص الآمن لمياه البلديات العادمة، وحتى لامكان استخدامها في الزراعة.

كذلك يعتبر التحليل الاشعاعي مناسباً بصفة أعظم في استنباء التغير اليومي للمياه المحفوظة في النبات فضلا عن تلك التي في التربة، وسيكون ذلك في غاية الأهمية لتطوير الفلاحة الجافة. وفي مجال الموائع مع ذلك، يمكن للمرء أن يذكر حقيقة أن المشكلة العالمية للطاقة قد حثت على تقييم جديد للامكانات الكامنة في مصادر الطاقة الجيوحرارية. فالنظائر البيئية تستخدم في الدراسة الايدرولوجية للانظمة الجيوحرارية، وعلى سبيل المثال لتقييم منطقة تجدد المياه، ظواهر المزج بين مختلف الموائع ومدد المزج. ويعتبر تقدير درجة حرارة الخزان متغيراً رئيسياً، وفي هذا الشأن، يكون من المتوقع أن تلعب الترمومترات الجوفية النظائرية دوراً متزايداً في المستقبل. واضافة الى ذلك، فان استخدام النظائر الصناعية في قياسات المياه السطحية، فضلا عن استخدامها في الأساليب الفنية «لفتحة الثقب» (من أجل تعيين سرعة المياه الجوفية)، يمكن أن تُدَعَّم باستعمال المقتفيات المنشطة اشعاعياً.

(٤) تعقيم المستودعات الصيدلية ومستودعات المستشفيات

ان العقاقير الحساسة للحرارة، والمضادات الحيوية، والمحصنات وأنظمة الانزيمات يمكن أن تعقم بالاشعاع بدون التضحية بالقدرة. فمستودعات الجراحة والمستشفيات التي تعالج في كميات بقواعد تقليدية، وبعمليات تداول آمنة ومكلفة، يمكن ان تُعقّم باستمرار في عبوات محكمة الاغلاق.

التصوير الاشعاعي: إن متطلبات جديدة في التصوير الاشعاعي لمقاطع من

الصلب سميكة جداً ، ولدافعات الصواريخ الصلبة والمواد الانشائية الغير عادية والمركبات المعقدة ، قد زادت كثيراً مع التقدم في التقنيات النووية وتقنيات الفضاء ، كما خلقت مطلباً ملحاً لمصادر سينية عالية الطاقة يعتمد عليها صناعياً :

أ) طاقة تفوق تلك التي يحتاج اليها في التصوير الاشعاعي ، بما يسمح باقصى اختراق وأدنى تأثيرات تشتت .

ب) كثافة عالية تتيح خارجاً عالياً للتصوير الاشعاعي وأزمان تعريض قصيرة .

ج) حجم دقيق لنقطة التركيز لمواجهة المتطلبات القاسية لتحديد جيد وتصوير اشعاعي مميز .

د) الاندماج الذي يكون كافياً ليتيح سهولة حركة مصادر التصوير الاشعاعي .

وبالنسبة للمعجلات الخطية المقياسية للتصوير الاشعاعي تستطيع الصناعة اختيار مصدر الاشعة السينية ذي الفاعلية الأعظم عوضاً عن الأخذ بالحل الوسط على حساب النوعية والكفاءة بسبب ما تفرضه المعدات من قيود . فهذا الجهاز يمكن صانعي الصواريخ وأوعية الضغط الضخمة والمسبوكات الثقيلة واللحامات في أن يتبنوا طرقاً جديدة للتحكم في النوعية التي تقدم مزايا اقتصادية منافسة وبارزة .

إن هذه الماكينات المقياسية تقدم طاقات للأشعة السينية متغيرة من ٣ الى ١٥ م إف . ونموذجياً يمكن القول أن معجلاً خطياً عند طاقة ٨ م إف ينتج ١٠٠٠ روينتجن في الدقيقة على بعد متر واحد وبنقطة تركيز قدرها ١ ملي متر ، وينتج ما يصل الى ٦٠٠ روينتجن بنقطة تركيز ٥ ملي متر . ومن المستطاع تصوير سمك من الصلب اشعاعياً بنجاح الى ٢٠ بوصة في حدود أزمان

التعريض العملية وذلك بمعجل خطي ١٥ م إف قدراته الخارجة هي ٣٠٠ روينتجن ونقطة تركيز ١ ملي متر.

ويلاحظ أنه في التطبيقات المتخصصة مثل التصوير الاشعاعي المتوهج تتواجد معجلات الأشعة السينية الخطية بخواص فريدة وبطاقات حتى ٣٠ م إف. ومن الممكن كذلك بناء معجل ٢٥ م إف يعطي ٢٥٠٠٠ روينتجن/دقيقة عند متر واحد عندما تكون مثل هذه الكثافة والطاقة مطلوبة ويمكن استغلالها. كذلك رأينا أن المعجل الخطي ٢٠٠ م إف حاقن البروتونات لمحطم « فيرمي لاب » الذري ٥٠٠ ـ ب إف يستخدم لتطبيقات تصوير اشعاعية متخصصة للغاية.

هذا ويجدر بالذكر أنه لا يمكن اعتبار أياً من العمليات السابقة فريداً بالنسبة للاشعاع فكل التطوير قد أنجز بالتنافس مع العوامل المساعدة والحرارة على أساس: السرعة، والسهولة، والتحكم الدقيق للعملية الهندسية، ثم الاقتصاديات. ويستطيع الاشعاع الالكتروني تزويد بلمرة سريعة عند درجة حرارة الحجرة مع انبعاث قليل للمذيب إن وجد.

وبظهور قوانين للتلوث أكثر شدة، قد يثبت معالجة الطلاء بالاشعاع أنه أعظم الطرق اقتصاداً للحصول على انبعاثات منخفضة للركام. فنظراً لأن الطلاء المعالج بالاشعاع هو نظام بلا مذيب بصفة أساسية فلن يكون مطلوباً كميات هائلة من الحرارة لما بعد المشعلات أو أنظمة تنقية كبيرة لتنظيف غازات الركامات.

هذا وستعالج اقتصاديات المعالجة الالكترونية في الباب الثالث.

٢ ج ٣ النظائر المشعة المنتجة في المعجلات

إن تطبيقات النظائر المشعة تُعالج بتفصيل شديد في الجزء من « التقنية النووية » المعنون « النظائر المشعة وتطبيقاتها » ـ تأليف د. ش. فاليه، لذلك

سنكتفي هنا بأن نعالج النظائر المشعة المنتجة بالمعجلات في مداولة مختصرة بعض الشيء .

كما ذكرنا في المقدمة ، فان النظائر الطويلة العمر المنتجة بالمفاعل والتي يمكن الحصول عليها تجارياً ليست في الغالب أفضل ما يكون مناسباً للتطبيقات الطبية والبيولوجية والصناعية . إن أعمارها النصفية الطويلة يمكن أن تؤدي الى أخطار التلوث أو التدمير ، وهي لا تتيح اختبارات متكررة عند فترات زمنية قصيرة ، كما أن الاشعاع المنبعث يمكن أن يكون له خواص طبيعية غير مرغوبة .

فالسيكلوترونات ، على سبيل المثال ، يمكنها أن تنتج تشكيلة واسعة من النظائر الناقصة النيوترونات ، باختيار عريض للأعمال النصفية ، العديد منها يعتبر باعث بوزيترونات بما يكون الكشف عنها يسيراً . وبعض الأمثلة القليلة للتطبيقات العديدة للنظائر المنتجة بالمعجلات هي الكشف عن الأورام والآفات وقياسات إنسياب الدم وقياسات عن تآكل المواد ، والانتشار المعدني ، والكشف عن التسرب . على أن النظائر المنتجة محلياً بواسطة نظام « البقرة » (cow system) من نظير أصل طويل العمر لا تستطيع أن تغطي جميع المتطلبات الممكنة .

ويجدر بالذكر أن النظائر المشعة المنتجة بالمعجلات تفضل في عدة تطبيقات طبية وبيولوجية نظراً لأن العمر النصفي المثالي يعتبر قصيراً بقدر غير مريح للنقل من المنتج الى مستخدم نائي . والعمر النصفي القصير يكون مطلوباً في الغالب وذلك لتجنب التشعيع الغير ضروري للأنسجة . وهناك تشكيلة عريضة يمكن الحصول عليها كذلك من السيكلوترون بما يزيد فرص الحصول على نظائر بخواص طبيعية مقبولة . فعلى سبيل المثال غالباً ما نتجنب باعثات اشعاعات بيتا وجاما المنخفضة الطاقة حيث تعمل على تشعيع الأنسجة دون ما نحصل على معلومات مفيدة . في حين أن باعثات البوزيترونات التي يمكن الكشف عنها

بسهولة بطرق التطابق تكون مفضلة في الغالب.

ويذكر هنا أن عدداً لا يستهان به من النظائر قصيرة العمر انتاج السيكلوترون تناسب مثالياً التطبيقات السابقة. وبهذه الطريقة لا تقدم مشاكل للحصول عليها كما أن تكلفتها يمكن أن تكون أقل بشكل ملحوظ. فعلى سبيل المثال، نرى أن ما يسمى «اكتيترون» ـ الذي يعتبر سيكلوترون متغير الطاقة من ٦ إلى ٩ م إف للبروتونات و٣ إلى ١١ م إف للديوترونات، ويصنع بواسطة «تومسون سي إس إف» ـ يستطيع أن ينتج النظائر التالية[٨].

النظير المشع	العمر النصفي	النظير المشع	العمر النصفي
ك^{١١}	٢٠ر٤ دقيقة	ح^{٥٢}	٨ر٣ ساعة
ن^{١٣}	٩ر٩٦ دقيقة	كو^{٥٥}	١٨ ساعة
أ^{١٥}	٢ر١ دقيقة	م^{٥٢}	٥ر٦ ساعة
فل^{١٨}	١ر٨٧ ساعة	م^{٥٦}	٢ر٥٨ ساعة
ص^{٢٤}	١٥ ساعة	خ^{٦٢}	٩ر٣ ساعة
فو^{٣٢}	١٤ر٣ يوم	نح^{٦٤}	١٢ر٩ ساعة
كل^{٣٤}	٣٢ دقيقة	جا^{٦٨}	٦٨ دقيقة
بو^{٤٣}	٢٢ر٤ ساعة	بر^{٧٧}	٥٧ ساعة
كر^{٤٨}	٢٣ ساعة	ى^{١٢٣}	١٣ ساعة
كرا^{٥١}	٢٧ر٨ يوم	^{١٩٧}	٦٥ ساعة

(يمكن العثور على قائمة كبيرة في الرسالة رقم ٥٩٠ في كلية طب بوردو):

«المساهمة في دراسة النظائر المشعة للسيكلوترون للاستخدام الطبي»، تأليف جي. إل. موريتي.

ومن الممكن استخدام هذه النظائر في تجارب حيث اثنان من المقتفيات

ذات العمر القصير والطويل تكون ضرورية. فخواصها الاشعاعية تكون في الغالب أفضل بكثير من النظائر المنتجة في المفاعلات، وعلى سبيل المثال اليود (ى) ١٣٢ يمكن أن يستعمل عوضاً عن ى^{١٣١} في ٩٤٪ من الحالات كما أن جرعة تشعيع المريض أقل مائة مرة، مع دقة أكثر في القياسات.

ويجدر بالذكر أن عديداً من المختبرات تفحص امكانية استعمالات النظائر المنتجة في السيكلوترون، كما أن تطبيقات عديدة جديدة قد اقترحت. ومن الاستخدامات الشهيرة الأكسجين وثاني أكسيد الكربون أو المياه المرقم بأكسجين ١٥ لدراسات أداء الرئة وقياسات سريان الدم أو تقديرات المياه في الرئتين. وقد استخدمت أحماض الكاربوكسيليك المرقمة بكاربون ١١ في دراسات الكبد والكلية، كما استخدم بنجاح حامض الفوسفوكلوروبينزوييك المرقم بنفس النظير في مركزة أورام المخ، ويستخدم الفلوريدات المرقمة فل^{١٨} في الكشف عن آفات العظام أو أورام المخ لجرعات اشعاعية للمرضى أقل ١٠٠٠ مرة منها بالكالسيوم ٤٧ ويمكن قياس التهوية المنطقية وإنسياب الدم بالنتروجين ١٣. أما الأيدوهيببوريت المرقم بالأيودين ١٢٣ فيمكن أن يستخدم لمركزة الآفات، الى آخره. وتستعمل قبل الآن أكثر من ٣٥ نظير في أكثر من ١٠٠ طريقة مختلفة. ويجب أن يذكر أن الأكسجين ١٥ والنتروجين ١٣ والفلور ١٨ التي تستخدم على نطاق واسع ليس لها نظائر طويلة العمر. ويعتبر الكربون ١٤ عديم الفائدة بعمره النصفي ذي ٥٠٠٠ سنة، في حين أن الكربون ١١ نظير مفيد، وعلاوة على ذلك هو باعث للبوزيترونات مثل أ ١٥، كر ٤٩، ح ٥٢، نح ٦١، ى ١٢٣. وهذا بالغ الأهمية في الطب. إن مثل هذه العناصر يمكن انتاجها بسهولة بأن تصدم المواد المناسبة بحزمة أشعة السيكلوترون. فمثلاً الكربون ١١ يحصل عليه بأن يصدم هدف ب$_{٢}$ أ$_{٣}$ الذي يمكن ادخاله في السيكلوترون وكذلك ك أ، ك أ$_{٢}$ المستخرج بواسطة نظام تفريغ السيكلوترون بكفاءة ٧٠ الى ٨٠ في المائة. وفي حالة الأكسجين ذي

العمر النصفي القصير جداً يمكن أن ينقل الغاز ذو النشاط الاشعاعي من السيكلوترون بواسطة أنابيب ويستخدم على الخط (on Line).

بعض التطبيقات الصناعية للنظائر المشعة:

لعل أحد التطبيقات الصناعية النمطية هي قياس التآكل بان تُدمج مواد مرقمة في أجزاء متحركة. وبهذه الطريقة يجري الكشف بسهولة عن كميات متلاشية الصغر من هذه المواد في زيت التشحيم. ان الميكانيكية الأساسية لبعض العمليات قد فحصت باستخدام العناصر المشعة مثل نزوح المعدن المدعم في طبقة أكسيد المهابط في أنابيب الراديو. وغالباً جداً ما أدت هذه الأساليب الفنية الى تحسينات كبيرة.

وعلاوة على ذلك تستخدم المركبات المرقمة في عمليات التصنيع حيث لا يتوفر شيء آخر كما في الكشف عن التسرب في الأجهزة المغلفة (المكبسلة)، وأوعية التخزين أو الكابلات الجوفية أو الأنابيب.

النظائر المشعة المنتجة بالمعجلات الخطية:

وبخلاف السيكلوترونات، تعطي المعجلات الخطية لباحث المختبر وسيلة للوصول الى تشكيلة واسعة من النظائر المشعة للتجارب والتطبيق والتي ربما لا يتيسر الحصول عليها بأي وسيلة أخرى. فالعديد من هذه لا يمكن عملها في مفاعل أو يكون عمر النصف لها قصيراً بحيث يصعب او يستحيل نقلها من المفاعل الى المختبر، وتنتج المعجلات الخطية النظائر إما خلال التصادم بالنيوترونات الحرارية (يعطي معجل خطي ٢٥ ـ م إف، ١٠ ـ ك وتدفقاً حرارياً قدره ٢ × ١٠^١١ نيوترون/ثانية/سم^٢)، أو بواسطة التصادم المباشر بالفوتونات فوق ١٥ م إف وقد انتج أربعة وثمانون نظيراً بهذه الطريقة منها ثمانية وخمسون ليس من المستطاع انتاجها في المفاعل.

وتتضمن تطبيقات النظائر المشعة المنتجة في معجل خطي على التحليل التنشيطي بالنيوترونات دراسات التآكل والصدأ، ودراسات المقتفيات في الصناعة والطب. أضف الى ذلك أن الأسلوب الفني للاصطدام بالفوتونات يمكن أن يطبق على التحليل التنشيطي بالفوتونات موضحاً بذلك وسيلة اضافية متعددة الاستعمال في المختبر.

ولكل هذه التطبيقات تكون النظائر المشعة القصيرة العمر في الغالب مفضلة دائماً بسبب تكلفتها أو خواصها الطبيعية: خواص الاشعاع المنبعث أو التخزين، المداولة أو مشاكل التخلص منها. ومن مثل النظائر المشعة القصيرة العمر من انتاج السيكلوترون تصير باعثات البوزيترونات متاحة أكثر، وتتزايد قائمة المستحضرات الصيدلانية المشعة المنتجة صناعياً.

على أن التطوير البالغ الأهمية يتمثل في التصوير السطحي بالأشعة باستخدام باعثات البوزيترونات مستغلين اشعاع جاما الناتج عن تلاشيها.

ولعل واحداً من أعظم الطرق نجاحاً في الطب الاكلينيكي وفي البحث البيوطي هو التحصين بالتحليل الاشعاعي - راديو إميونوآسي Radioimmuno-assay. فهو عالي التوصيف، على الأقل لو طبقت الأساليب الفنية لما يسمى بازدواجية مضاد الجسم. وقد وصل ذلك الى مستوى البيكوجرام من الحساسية، وتتراوح الدقة بين ± ١٠٪ نزولاً الى ± ٢٪، ولو أنها يمكن أن تتحسن بالتأكيد في المستقبل(٧)، تفضيلياً بواسطة الاعداد التلقائي للعينة. ولقد طور في الوقت الحاضر أكثر من ٨٠ نوعاً من «الرايواميونوآسي»، وسيتزايد هذا الرقم بدون شك. وقد أجريت في عام ١٩٧٥ اختبارات لمائة مليون «راديو إميونوآسي» في مختلف أنحاء العالم، ومن المقدر أن عدد الاختبارات سيصل الى ٢٥٠ مليون في عام ١٩٨٠.

٢ ج ٤ تقييم المواد :

ان تأثير الاشعاعات النووية على الأجزاء الالكترونية وأنظمتها يعتبر ذا أهمية خاصة ليس فقط للمفاعلات النووية ولكن كذلك للصواريخ والتوابع ومركبات الفضاء. والذي كان يشار اليه في وقت ما على أنه « تخريب اشعاعي » قد صار شكلا من « الاختبارات البيئية » وذلك كلما تقدم فهم الظاهرة. وإن تقديراً استقرائياً ضئيلاً للفائدة هو التماثل المختبري للتأثيرات الاشعاعية من التفجيرات النووية من خلال طلقات كثيفة ومتحكمة للأشعة السينية أو النيوترونات من معجل قوي. ولقد انبثق من دراسات التخريب الاشعاعي بحوث الجوامد بالجسيمات النووية، مؤدية الى تحسين خواص اشباه الموصلات لتطبيقات الترانزيزتورات.

ويذكر هنا أن الاختبارات البيئية للأنظمة الالكترونية ذات أهمية في عصر الفضاء، وعلى الأخص تأثيرات هبة التفجيرات النووية على أنظمة التوجيه الالكتروني، أو الاضمحلال التدريجي لأجهزة الجوامد حالما تمر عبر حزام فان آلن الاشعاعي في التوابع. وهناك بحوث مكثفة تجري في مجال تقييم المواد مستخدمين الوسائل الفنية المختلفة. كما كشفت البحوث التطويرية على مجهر أيونات النقل الماسح تأثير اللمعان النوعي (specific brightness) لمصدر الأيونات، على درجة التحليل المتاحة.

ويعمل هنا على أن تمسح حزم البروتونات العينات البيولوجية بدرجة تحليل حوالي ٢٠٠٠ أنجستروم[٩]. ويبين تحليل للتدمير الحادث للمادة البيولوجية نتيجة ضربها بالبروتونات أن هذا التدمير لا ينبغي أن يزيد كثيراً عن ذلك الذي يحدث بواسطة مسبار الكتروني لكميات مقارنة من المعلومات التي نحصل عليها.

وفي الحقيقة بالرغم من أن المجهر الالكتروني قد طور على مدى العقود المتعددة الماضية الى درجة عالية من الأداء لدرجة إنه أمكن التوصل الى قدرة

تحليل بين ٢ الى ٣ انجستروم ، إلا أنه لم تُكرس جهود مستمرة لاستخدام الحزم الأيونية لغرض الاجهارية بمعنى تصوير الأشياء الصغيرة بدرجة تحليل كبيرة. وحديثاً فقط استخدم الميكرومسبار (ميكروبروب)[١٠] كأداة تحليلية قوية لقياس العطاء العنصري والنظائري في أحجام متناهية الصغر للمواد مثل العينات الجيولوجية بما في ذلك الأكاسيد والكاربونات والكبريتيد.

وقد فحصت أمثلة لتحليلات رئيسية وثانوية وعناصر مقتفية باستخدام منحنيات عمل ومنحنيات حرارية ديناميكية. كما أن التحليل لعناصر مقتفية تستغل طريقة « بيكسي » (انبعاث الأشعة السينية المستحث بالبروتونات) يعطي نتائج مرضية لتحليل عينات لمساحيق نمطية لترسيب النحاس دون اعداد كيميائي مسبق.

وكمثل لهذه الوسيلة الفنية[١١] يكون استخدام معجل الفان دي جراف الذي يعطي حزمة لأشعة البروتونات بطاقة ١ر٦٤ م إف لاثارة عينات من رقائق الميلرسمك ٥ ميكرو متر/سم². ويستخدم جهاز ميكرومسار آخر للبروتونات معجلاً ٦ م إف من الفان دي جراف التعاقبي أو تزود حزمة أشعة للبروتونات ذات نسبة ١٠⁴ للكثافة الكلية للحزمة الى الكثافة المقاسة خارج الحزمة في حلقة لها قطر داخلي ٢٠ ميكرومتر وخارجي ١ ملي متر. وقد تراوحت شدة التيار بين ٥ و٢٠ بيكروأمبير/ميكرومتر² لتيارات للحزمة بين ٣ر٠ و١ ميكروأمبير مقاسة على المغناطيس المحلل لنظام نقل الحزمة. ويُدَّعى أن مثل هذا الميكرومسبار البروتوني يقارن بامتياز بالميكرومسبار الالكتروني وعلى الأخص في تحليل العناصر المقتفية بتركيزات فيما وراء الحد الكشفي للميكرومسبار الالكتروني ، وللتحليل الانشائي للأشياء المعقدة بعناصر مقتفية متعددة تمتد فوق مدى واسع للاعداد الذرية. والتطبيق الآخر الهام في تقيم المواد هو تحليل الجوامد بواسطة أيونات التيارات الخلفية وعملية « التخديد » (channelling) . هذا ويزود التشتت الخلفي للأيونات وسيلة

لتحليـل « مجـاورات أسطـح » الجوامـد للحصول عـلى توزيـع أعمـاق التـكوين الذري. وعلى سبيل المثال[١٣] يمكن عمل قياسات باستخدام حزمة أشعة هيليوم ٢ م إف وذلك من السطح حتى عمق حوالي ١ ميكرومتر بثبات عمق مقداره ١٠٠ الى ٣٠٠ أنجستروم. ويمكن استنتاج ميزة هامة من كون هناك مقدرة للحصول على صورة جانبية للعمق دون الحاجة الى استخدام الوسائل الفنيـة لازالـة الطبقـة. والشدة الاضـافيـة للوسيـلة التقنيـة للتشتـت الخلفي للأيونات هي أن متغيرات التصادم الذري اللازم للحصول على تركيزات مطلقة يمكن تعيينها بسهولة للأنظمة العنصرية وتطبق على نحو غامض للمركبات ذات التركيب المتغير. إن أعظم استعمالات التشتت الخلفي للأيونات أهمية يكمن في تعيين الصور الجانبية للتركيب وللسمك والشوائب. ويذكر هنا أن مجال الميكروإلكـترونيـات هو واحـد من المنـاطـق التقنيـة الـتي شهدت الاستخـدام الأوسع نطاقاً لهذه الوسيلة الفنية. وهذا يمكن ادماج التشتت الخلفي للأيونات مـع « تخـديـد » الأيونـات للحصول عـلى معلومـات للبلورة البيـانيـة. ويحـدث « تخديد » الأيونات عندما تُصف حزمة شعاع الأيونات المركزة مع صفوف بللورات مفردة أو مستويات. وتوجه جسيمات التخديد داخل سلسلة من تصادم « كولوم » الرقيق وهكذا تُمنَع من الاقتراب من صفوف الشبكة (المستويات) بأقرب من حوالي ١ر٠ أنجستروم. ومن الممكن تطبيق « التخديد » الأيوني لدراسات الإرباك البللوي وللتحديد الشبكي للشوائب في البللورات المفردة. على أن التطبيقات الأعظم انتشاراً حتى تاريخه كانت لدراسة أشباه الموصلات وعلى الأخص « للغرس » الأيوني في أشباه الموصلات. ويؤسَّس تحليل التشتت الخلفي للأيونات على تعيين فاقد طاقة الأيونات في الجوامد. وينتج فاقد الطاقة من التشتت النووي المرن، الغير متكرر الحدوث نسبياً، وذلك من التهييج المستمر للالكترونات. وينجز تحليل التشتت الخلفي نموذجياً عند طاقة للأيونات قدرها ١ الى ٢ م إف. وتعطي أيونات الهيليوم أفضل اندماج لثبات الكتلة

والعمق ، بينما تكون البروتونات ملائمة لسبر أعماق أعمق . ومن ناحية أخرى يتطلب التخديد الأيوني استخدام البللورات المفردة التي يمكن أن توجّه بالنسبة الى حزمة أشعة الأيونات المجمعة . ويمكن أن توجد أمثلة مفصلة في المرجع « ٥ » لتطبيقات التشتت الخلفي ولتخديد الأيونات .

وفي النهاية نشير الى الأسلوب الفني للتحليل الكتلي للأيونات الثانوية حيث تسقط حزمة لأشعة الأيونات عالية السرعة فوق عينة صلبة محفوظة في تفريغ عالي (١٠$^{-٦}$ الى ١٠$^{-١٠}$ تور) مثيرة عدداً من الظواهر المشوقة[١٤] . أولها التقسيم العام للعمليات المتَضّمنة في انتاج الأيونات الثانوية الى عمليات « حركية » و« كيميائية » . فالعملية الكيميائية تحدث عندما تصدم العينات الكيميائية الغير مدمجة بحزم لأشعة الأيونات متكونة من غازات غير متفاعلة كيميائياً مثل الأرجون . ففي هذا الظرف يمكن أن نمعن النظر في عدد من التصادمات من نوع « كرة البليارد » تحدث قريباً من سطح العينة بما يعطي فرصة نقل طاقة كافية الى ذرات الشبكة بما يسبب انطلاقها من السطح . أما عملية التأين الكيميائي فتتوقف على وجود فصائل متفاعلة كيميائياً في حزمة أشعة الأيونات الأولية ، وفي العينة ، ثم في التفريغ المتخلف المحيط بالعينة .

ومثلما قد يشك المرء ، فان أفضل تأثير كيميائي يحدث عندما تكون حزمة شعاع الأيونات هي الصنف المتفاعل ، مثل أ$_{٢}^{+}$ أو أ$^{-}$. كذلك تُظهر الأكاسيد والكلوريدات أو المركبات المماثلة في العينة آثاراً كيميائية . فاذا تواجد مثل هذا الظرف فان تقليل تعادل الأيونات يسبب تزايداً كبيراً في عدد الأيونات المنبعثة لدرجة أن الميكانيكية الكيميائية تتغلب على العملية الحركية . وتوضح النتائج[٦] انخفاضاً عنيفاً في عطاء الأيونات الثانوية للألومنيوم على الألومنيوم النقي باستخدام الأرجون كحزمة رذّاذة (sputtering beam) .

وعامل آخر يُؤخذ في الاعتبار وهو أن كل عنصر له عطاء أيوني رذاذ مختلف يكون ذا اتصال بتركيب العينة ، وتكوين المركب وارتباطات العنصر

في المحاليل الصلبة، وظواهر أخرى عديدة.

وتتضمن مزايا الأسلوب الفني للتحليل الكتلي للأيونات الثانوية الآتي: تحليل خطي « سيني- صادي» للسطح أفضل من ١ ميكرومتر، وتحليل « هـ » (عمق) قدره ٢٥ الى ١٠٠ أنجستروم والذي يزيل الحاجة لعمل المقطع أو الازالة المتتالية للمادة بوسائل ميكانيكية أو كيميائية، مقدرة نظائرية باحكام وضبط الى نسبة مئوية نسبية من ١ر. الى ١، وكفاءة عالية، وامكانية كشف متطرف من حوالي ١٠-٩ جم (ألومنيوم) الى ١٠-١٤ جم (ذهب) في المنطقة المحللة، وتحليل العوازل باستخدام أو بدون استخدام رقيقة معدنية الى سطحها.

وتتضمن تطبيقات التحليل الكتلي بالأيونات الثانوية توزيع الكربون في الصلب الغير قابل للصدأ (ليعطي صورة جانبية للعمق)، وتوضيحاً لقدرات تحليل الرقائق الرفيعة (مثلاً، تحليل س أ٢ الذي يُنمى حرارياً على السيليكون).

التحليل التنشيطي:

مثلما ذكرنا في المقدمة، فان تحليل المركب الكيميائي ذي كميات صغيرة جداً من المادة، أو تعيين كميات متناهية الصغر للشوائب في عينات كبيرة، يمكن أن تؤدي غالباً - أو ربما فقط - بأقصى ما يلائم بواسطة التحليل التنشيطي. ففي هذه العملية تُصدم العينة بجسيمات من المعجلات أو المفاعلات النووية ثم تحلل خواص طيف انحلال النشاط الاشعاعي من نواتج التفاعل. ومن هذا التحليل يمكن الكشف عن الشوائب على مستوى أجزاء في المليون، أو حتى أجزاء في البليون. وتستطيع النيوترونات الناتجة من التفاعل الحادث كنتيجة لتصادم حزمة أشعة الجسيمات المعجلة مع الهدف المناسب أن تخترق المادة بسهولة أكثر من معظم الجسيمات الأخرى. فهي تتفاعل مع الأنوية عند

جميع مستويات الطاقة لأنه لا يوجد حاجز كولوم المطلوب التغلب عليه، ولكن طاقة النيوترون ان هي الا وسيلة قوية لتمييز تفاعل مميز من تفاعل طفيلي. لهذه الأسباب يكون التحليل التنشيطي للنيوترونات صعباً في المفاعلات التي تنتج أساساً النيوترونات الحرارية التي تتفاعل بصفة عامة مع الأنوية لتحرير الفوتونات. وهي كذلك محددة بمولدات هدف التريتيوم البسيط التي تنتج نيوترونات ١٤ م إف فقط. وهذه النيوترونات متيسرة من تفاعل الديوترون - تريتون في معجلات صغيرة (١٥٠ - ك إف) ومن السينكلوترونات. ومع ذلك فالنيوترونات متغيرة الطاقة حتى ٣٠ م إف تكون متاحة بصدم هدف البيريليوم بالديوترونات. ويمكن استخدام امكانية تغيير الطاقة القصوى للنيوترونات الناتجة لتمييز التفاعلات الطفيلية التي لا يمكن أن تحدث تحت حد معين للطاقة يكون مستحيلا بمولدات الديوترون - تريتون. وعلى سبيل المثال[١٥]، فان الديوترونات ٧ م إف المتصادمة مع هدف البريليوم تنتج نيوترونات ذات طاقة قصوى ١٢ م إف بواسطة التفاعل بير٩ (يد٢ ، ن) ب١٠ . ويمكن استخدام هذه النيوترونات للكشف عن الفلور في الأوكسجين، فالتفاعل فل ١٩ (ن ، يد٢) ن١٦ له حد للطاقة مقداره ٦ر٤ م إف، والتفاعل ١٦٠ (بروتون ، ن) ن١٦ له حدّ للطاقة مقداره ٧ر١٢ م إف. ويلاحظ كذلك أن صدم الماء الثقيل بالديوترونات: ماء ثقيل (يد٢ ، ن) هـ٣ يعطي نيوترونات ٦ر١٠ م إف يمكن أن تستخدم للكشف عن آثار الفاناديوم أو الفوسفور في النحاس (حدّ الطاقة عند ٧٢ر١ - ٢ و٠١ر١١ م إف). لذلك فان السيكلوترون مفيد حيث يمكن استخدامه لتحليل أسرع وأكثر حساسية واقتصادي عن الطرق التقليدية.

الاختبارات الطبية:

لقد استخدم التحليل التنشيطي بالسيكلوترون كذلك في الاختبارات

الطبية ، ومثل على ذلك التقدم في وباء العظام الذي يمكن دراسته بقياس الكالسيوم أو الصوديوم من خلال التشعيع بنيوترونات ٥ م إف يحصل عليها بصدم هدف الليثيوم بالبروتونات . ويمكن قياس اليود في الغدة الدرقية بالنيوترونات السريعة في قياس يتلازم مع علاج اشعاعي نيوتروني .

ومن ناحية أخرى ، في تحليل نووي فوري ، يقاس الاشعاع الفوري المنبعث خلال التفاعلات النووية . ويمكن أن يتكون هذا الاشعاع من جسيمات مشحونة أو نيوترونات أو أشعة جاما ، وباستخدام جسيمات مختلفة ساقطة وطاقات مختلفة يمكن أن يصير عدد شروط التعريف الممكنة كبيراً بعض الشيء . وكمثل على ذلك فان تحليل الجسيمات المشحونة الفورية من التفاعلات النووية يقدم امكانية فحص التوزيع الفضائي مثلا لكميات صغيرة من الشوائب في الطبقات السطحية .

وعندما تصطدم الأيونات السريعة بالذرات تنبعث أشعة سينية كثيفة بعض الشيء حيث يمكن استخدامها لتعيين تركيب عينة ما . وتقدم هذه الطريقة حساسية أعلى من الاثارة بالالكترونات نظراً لأن الخلفية الناتجة من البرمزشترالونج (اشعة الفرملة) أقل بكثير ، ويسمح هذا بقياس عدد كبير من العناصر في نفس الوقت . ولقد استخدمت الطريقة بنجاح فائق لتحليل عدد كبير من العينات البيئية على شكل كميات من المادة صغيرة جداً تُجمَّع على مرشحات رقيقة .

التحليل التنشيطي بالجسيمات المشحونة[١٥] : بسبب الاختراق الضعيف للجسيمات المشحونة يعتبر التحليل السطحي مستحيلاً بأي وسيلة أخرى ، فمن الممكن أن نقيس التغييرات في تركيب المادة مع العمق (قياسات الانتشار ، الى آخره) بالتحليل المتكرر والجرش المستمر للسطح . وينطبق هذا التحليل كذلك على كل المواد المستخدمة في الرقائق الرفيعة ، فمثلا في صناعة أشباه الموصلات . وتعتبر تحليلات آثار العناصر الخفيفة في المعادن سهلة على العموم

نظراً لأن حدود التفاعلات تكون أعلى في العناصر الثقيلة بصفة عامة. لهذا يكون من الممكن أن نكشف آثار الاكسجين أو الكربون في المعادن، كذلك يكون من الممكن أن نتحاشى الأخطاء الناجمة عن تلوث السطح بواسطة استخدام طاقات أعلى من الكفاءة القصوى لدرجة أن الجزء الأعظم من النظائر المشعة يتكون خلف السطح. وتكون الحساسية في هذه التحليلات أعظم بكثير من أي طريقة أخرى. وباستخدام تصادم جسيمات الفا يمكن قياس محتوى الرصاص في الشهب بحساسية ١٠-٩ . ويبدو أن السيكلوترون هو أفضل أداة مناسبة في صناعة أشباه الموصلات حيث تكون قياسات العناصر الاستشفافية للشوائب بالغة الأهمية: فيمكن قياس محتوى البورون في السيليسيوم ببروتونات ٢٠ م إف منتجة التفاعل ١١ ب (بروتون، نيوترون) ١١ ك (٢٠٫٤ دقيقة)، و ٣٠ س (بروتون، نيوترون) ٣٠ فو (٢٫٥ دقيقة)[١٥]. ويمكن تعريف النتائج بسهولة نظراً لأن حزمة أشعة السيكلوترون ليست نابضة.

إن هذه الأساليب الفنية تنطبق في البيولوجيا حيث يمكن الكشف عن النيتروجين والأكسجين في محاليل مرققة بنسب أعلى من جزء في المليون بواسطة التنشيط البروتوني. ويمكن أن يكون هيليوم-٣ مفيداً جداً لهذه الدراسات بسبب انخفاض طاقة ترابطه النووية: وهكذا قيست محتويات الأكسجين والكربون الأقل من جزء في البليون بالمعادن أو المواد العضوية.

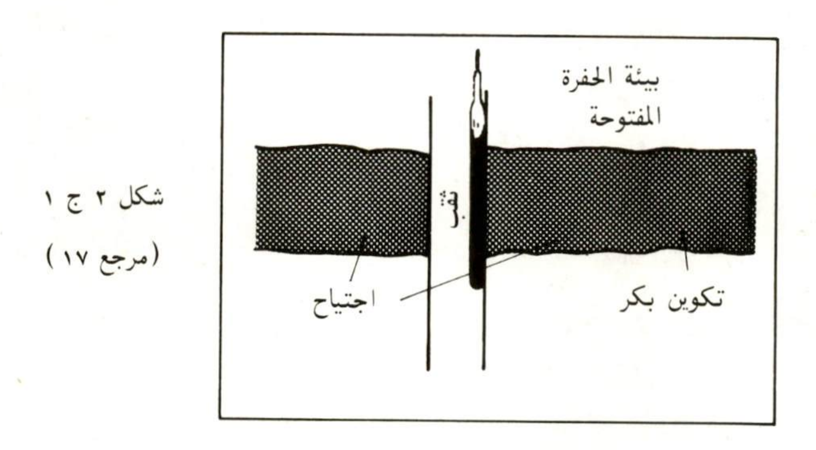
ولعل أحد الأمثلة العديدة للتحليل التنشيطي بمعجلات الديوترونات المنخفضة الطاقة المستخدمة لتفاعل «ديوترون - تريتون» لتوليد نيوترونات سريعة هو تحليل منتجات التآكل المعدني في الموائع الايدروليكية والتشحيمية للطائرات[١٥]. ويعتبر ذلك وسيلة تقنية ناجعة لتزويد دلالات مبكرة للأعطاب الميكانيكية المعوقة. ومولد النيوترونات هو معجل «كاما» ٢٠٠ - ك ف للديوترونات والذي عندما تتفاعل حزمة أشعة ديوتروناته مع هدف التريتيوم -

تيتينيوم يمكن أن ينتج تدفقاً من نيوترونات ١٤ م إف ذات ١٠^١٠ نيوترون/سم^٢/ثانية. هذا، وتحول العينات المطلوب تنشيطها الى مصدر النيوترونات وتوضع داخل دوَّار زوجي المحور. ويمكن مداولة عينتين في نفس الوقت، متيحاً بذلك مرجعاً قياسياً يتم تشعيعه مع العينة المجهولة. ويعمل القياس كمستنبىء للتدفق وكوسيلة لخلق الوضع العادي بين التجارب المختلفة. وبعد التشعيع يكون النقل الى موقع العد المحتوي على كاشف جيرمانيوم - ليثيوم الكبير الحجم ذي الثبات العالي تلقائياً وذلك من خلال استخدام نظام للحاسب الآلي، وأنبوبة أشعة المهبط وطرف الطباعة التلقائية (teletype). وهكذا يتم تحليل الأطياف المركبة الناتجة التي تتكون من مشاركات لمحتويات معدنية مختلفة. ولقد أسست وسائل الطيف الانبعاثي اقامة علاقات متبادلة بين نواتج التآكل والأعطاب غير أنها غير قادرة على الكشف عن جسيمات المعدن الكبيرة نسبياً المتواجدة في الفضالة التي يمكن أن تسبق بدء الانهيار الميكانيكي السريع «المأساوي». ويمكن أن يخدم التحليل التنشيطي بالنيوترونات السريعة كطريقة مكملة للكشف عن وتقييم المخلفات المعدنية بأسرها.

الكشف عن آبار النفط باستخدام معجلات «ثقب الفتحة» النيوترونية:
(Neutron Borehole Accelerators)

إن الاستخدام الآخر للنيوترونات المنتجة بالمعجلات هو الكشف عن آبار النفط، فمنذ ادخال معجل نيوترونات ثقب الفتحة في عام ١٩٥٩ طورت عدة أجيال من أجهزة الكشف (logging). وتقيس هذه الأجهزة زمن العمر للنيوترونات، ويرتكز التنشيط النيوتروني على العمر النصفي وكثافة اشعاع نواتج التنشيط، كما تأسر طيف أشعة جاما. ويعطي «هيلشي»[١٧] في بحث استرجاعي مناقشة تفصيلية لأجهزة «ثقب الفتحة» المستخدمة، وآثار نقل المعلومات عبر كابلات طويلة، وبيئات التشغيل المتطرفة المتعلقة بالموضوع.

ولقد طورت معجلات النيوترونات لمثل هذا التطبيق في الخمسينات لتميز بين الماء العذب والنفط ، وهو مجال فشلت فيه الوسائل التقنية التقليدية للكشف . ومن هذا التطوير جاء أول كشف نيوتروني نابض على مستوى تجاري (كشف زمن العمر للنيوترون) الذي يقيس زمن العمر للنيوترونات الحرارية أو المقطع الماكروسكوبي للأسر الامتصاصي للنيوترونات الحرارية . وقد حدث هذا في عام ١٩٦٣ . وكان الاستخدام التجاري الرئيسي التالي لمعجل النيوترونات هو نظام كشف الكربون/ الاكسجين . وقد لبى ذلك أهداف النفط ، وتقييم المياه الصالحة الذي تدعم في عام ١٩٥٩ . فقد كان ذلك بصفة أساسية هو نفس المعجل مسجل زمن العمر للنيوترونات . على أن مسجل الكربون/ الاكسجين قد ادخل في عام ١٩٧٣ .



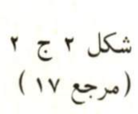
شكل ٢ ج ١
(مرجع ١٧)

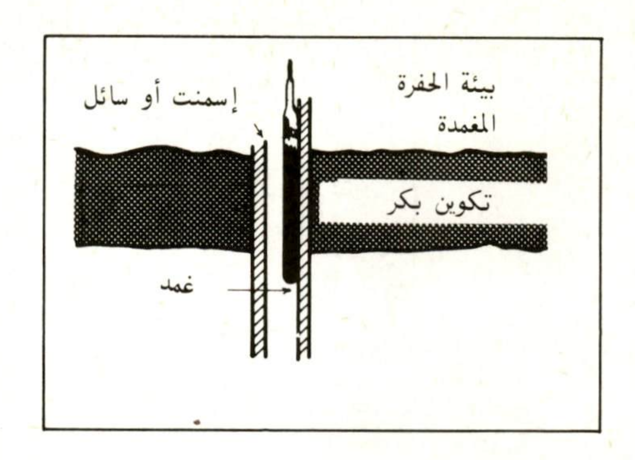
(باذن من صناعات دريسر)

يوجد بيئتان مختلفتان بصفة أساسية تتعرض لهما أجهزة التسجيل النووية . فالأولى هي أنظمة الكشف ذات الثقب المفتوح التي تعمل في بيئة كتلك التي تُرى في شكل ٢ ج ١ . هنا يُملأ « ثقب الفتحة » نموذجياً بطين

مؤسس يحفر في المياهأو يُملأ في بعض الأحيان بالزيت أو الغاز. وحول ثقب الفتحةالمملوء بطين أساسه ماء يُجتاح التكوين. وللكشف عن الايدروكربونات وتعيين محتواها كمياً يجب أن يرى جهاز التسجيل فيما بعد المنطقة المجتاحة. وبالاجتياح العادي يمكن أن تستخدم التسجيلات من نوع النيوترون فقط في تعيين كمية المائع في التكوين وليس نوع المائع في التكوين الغير ملوث، أما عن البيئة الثانية، التي يجري فيها معظم التسجيل النيوتروني النابض فهي «ثقب الفتحة» المغمد الذي يرى في شكل ٢ ج ٢. ويمكن أن يكون في الغمد الحديدي مياه مالحة أو طين حفر أو زيت أو غاز. وعادة ما يُملأ الفراغ بين الغمد والتكوين «بالاسمنت». وبعد عدة سنوات من الحفر يُملأ التكوين الواقع خلف «الاسمنت» عادة بموائع التكوين. وتكون البيئة المهيأة هي الفتحة المغطاة ذات أنبوب داخل الغطاء. وتسجل المعلومات من داخل الأنبوب أو من تحت نهاية الانبوب، كما يرى في شكل ٢ ج ٣، ويمكن أن تتضمن البيئات التسجيلية كذلك ضغوطاً تصل الى ٢٠٫٠٠٠ رطل/بوصة٢ ودرجات حرارة حتى ٥٤°ف. وتسري الاشارات المنقولة الى السطح بأجهزة التسجيل فوق كابلات كهربية يبلغ طولها ٣٠٫٠٠٠ قدم[١٧].

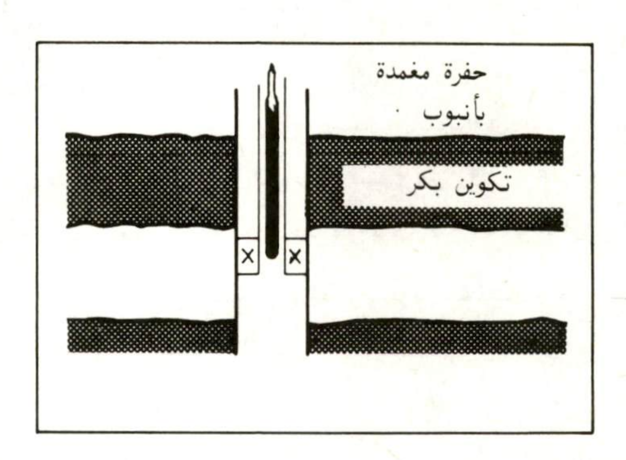
وقد كان مقياس زمن عمر النيوترون أول مقياس تجاري نابض للنيوترونات. ويقاس معدل تلاشي النيوترونات الحرارية خلال فترة هدوء النبضة. ويوضح شكل ٢ ج ٤[١٧] هذه العملية، حيث يُنبّض المصدر وتُولّد النيوترونات، ثم يوقف المصدر وتتلاشى النيوترونات في البداية سريعاً جداً بسبب أسر النيوترونات بواسطة الأدوات والغمد والمائع، الى آخره. وعندما يتحكم التكوين في معدل الأسر يستقر معدل التلاشي، وخلال فترة اشارة التكوين تُفتح بوابتان (٤٠٠ ـ ٦٠٠ و ٧٠٠ ـ ٩٠٠ ميكرو ثانية بعد طلقة الاشارة) حيث تعد أشعة جاما الناتجة من أسر النيوترونات الحرارية. على أن معدلي العد هذين يستخدمان لحساب مقطع أسر التكوين.


شكل ٢ ج ٢
(مرجع ١٧)

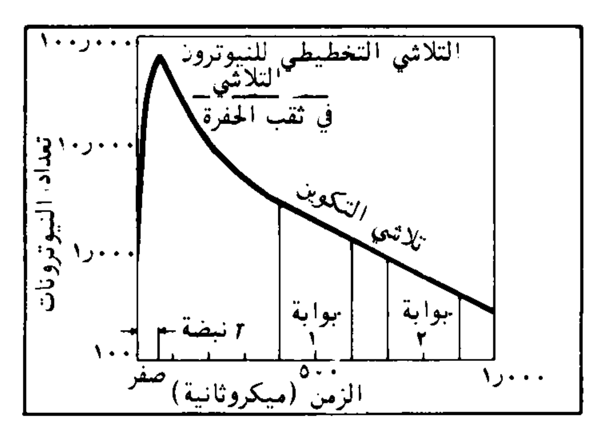


(باذن من صناعات دريسر)

شكل ٢ ج ٣
(مرجع ١٧)



(باذن من صناعات دريسر)



شكل ٢ ج ٤ (باذن من صناعات دريسر)
(مرجع ١٧)

$$\delta = 35 \text{ لو}_{10} \frac{ن_1}{ن_2}$$

ويجدر بالذكر أن مقياس زمن عمر النيوترون يستخدم في الآبار القديمة لتعيين ما اذا كان النفط أو الغاز موجوداً وتقدير كميته. وفي بعض الحالات لم تكن هذه الآبار قد قيست في السابق، أو أن تغييرات قد حدثت في تشبع الموائع منذ حفرت الآبار في الأصل.

يعطي شكل ٢ ج ٥ صورة لجهاز تسجيل زمن عمر النيوترون بمولد ومعجل فان دي جراف(١٧). ويذكر أنه أثناء التسجيل يُثبت في قطر خارجي $3\frac{5}{8}$ بوصة لمرأب الجهاز الصلب. كما تستخدم أجهزة أخرى بأحكام مختلفة.

وعلاوة على ذلك يُجرَى عند الكشف على الالومنيوم تنشيطه بحيث تشع النقطة ذات الاهتمام لعدة دقائق بمصدر المعجل، ثم يوضع الكاشف في مواجهة هذه النقطة التي يعين موضعها بسهولة كنقطة الاشعاع الأقصى. ويسجل معدل العد على صفحة مقادة بالزمن، وباستبعاد الخلفية الطبيعية على أساس التجربة والخطأ يمكن الحصول على الألومنيوم ذي العمر النصفي ٩٫٥ دقيقة. كما

يستخدم قياس الكربون/ الأكسجين للحصول على أطياف للنفط والماء[١٨].

٢ د التطبيقات البيولوجية والطبية

سنتناول في هذا الجزء قليلاً من التطبيقات البيولوجية للمعجلات، كمجرد أمثلة، مع مناقشة اطول بعض الشيء للاستخدامات العلاجية، حيث من المحتمل أن الاستخدام الوحيد الأعظم للمعجلات في كلا البيولوجيا أو الطب انما للعلاج الاشعاعي.

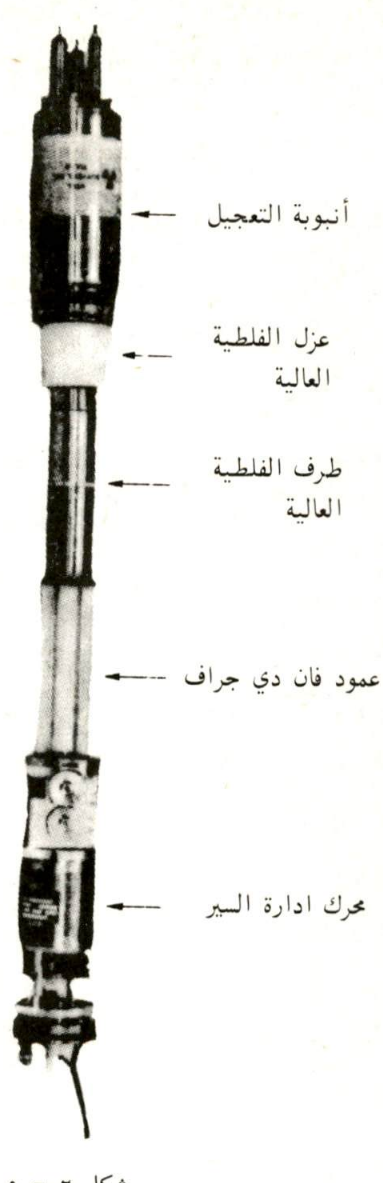
٢ د ١ التطبيقات البيولوجية:

ان تطبيق معجلات الجسيمات الثقيلة في الفحوص البيولوجية غزيرة، وسيعطى هنا أمثلة قليلة فقط:

١ ـ لقد استخدم سيكلوترون «ييل» (بأمريكا) لدراسات بيولوجية للجزئيات الكبيرة. ومن هذه طورت طرق لقياس أشكال ومقاطع الجسيمات الملتهمة والانزيمات.

٢ ـ أجريت دراسات بيولوجية في سينكروسيكلوترون للبروتونات تضمنت قياسات للفعالية البيولوجية النسبة «ف ب ن». (Relative Biological Effectiveness «RBE») للبروتونات التي بُطِّئت من ٤٦٠ م إف الى متوسط مقداره ٩٠ م إف. وقد وجدت القيمة التي قيست لـ «ف ب ن» ١٫٧٥ ± ٠٫٢٣ لتغير في وزن طحال فأر، وذلك باستخدام أشعة سينية ٢٥٠ ك ف كقاعدة للمقارنة.

٣ ـ في سينكروسيكلوترون آخر ٣٤٠ م إف استخدمت البروتونات في فحص آدمي للعلاج يتعلق بالتشعيع المتمركز للغدة النخامية الآدمية. ولقد أمكن الحصول على التمركز بواسطة ادماج التطبيق العديد المخرج والدائري لحزمة شعاع البروتون، وتحقق الدليل المؤكد على انخفاض الهرمون الخارج من



شكل ٢ ج ٥
(مرجع ١٧)

(باذن من صناعات دريسر . Dresser Industries, Inc)

الغدة النخامية. ويذكر أن المرضى الذين تلقوا العلاج كانوا حالات متقدمة لسرطان الثدي ذي النمو الانبثاقي. وقد استخدم كل من بروتونات ٣٤٠ م إف وديوترونات ١٩٠ م إف من السينكروسيكلوترون للتشعيع «الهيبوفيسوكتومي» للحيوانات. كما أمكن احداث تلفيات صغيرة في المخ (بقدر ما قيمته ملي متر مكعب) في الحيوانات بواسطة اصطدام الجسيمات الثقيلة. فهذا يمكن أن يخدم كأداة لدراسة الوظائف الفسيولوجية للمواضع المتعددة للنظام العصبي المركزي.

٤ ـ استخدمت بروتونات من معجل فان دي جراف ٢ م إف لتصدم الخلايا الفردية الحية بتيار صغير جداً لحزمة الأشعة. ولقد تفاوت عدد البروتونات للخلية الواحدة المتعلقة بهذه التشعيعات من ١٠ الى عشرات الآلاف، وكان من الممكن باستخدام أكثر الوسائل التقنية تقدماً للورش والاجهارية أن يُسجل على أفلام للصور المتحركة دورة حياة الخلايا العادية والتي صدمت. وقد اكتشفت حقائق جديدة من هذه البحوث فيما يتعلق بأشياء كوظيفة الأعمدة في تقسيم الخلايا.

٥ ـ إن التأثيرات البيولوجية للأشعاع بالنيوترونات السريعة المولدة في المعجلات قد أثارت اهتماماً عاماً في عدد من معاهد البحوث الطبية، وهذا راجع الى ظهور دلالة بأن النيوترونات السريعة[١٩] بطاقات فوق ٥ م إف يمكن أن تعطي حلاً لمشكلة خطيرة تواجه أطباء الأشعة، وتلك هي المقاومة الكبيرة للاشعة السنية التي تحدثها خلايا الأورام الساكنة التي تحرم من الأكسجين كلما مُنعت الأورام من تزويدها بالدم[٢٠]. وقد أوضحت هذه الدلالة التي كانت قد تجمعت على مدى السنوات القليلة الماضية من خلال البحث بمزارع الخلايا وأورام الحيوانات أن النيوترونات السريعة يمكن أن تقتل خلايا الورم الذي ينقصه الأكسجين بمثل سهولة الخلايا الأكثر شيوعاً الجيدة التأكسد. وبالتباين تكون الأشعة السنية أقل فاعلية بكثير ضد الخلايا الناقصة الأكسجين. هذا،

وستعالج المشكلة عند اعتبار النيوترونات السريعة في علاج السرطان.

٢ د ٢ التطبيقات الطبية:

انه منذ استخدمت الأشعة السينية أولاً في علاج السرطان، كان هناك طلب لطاقة أعلى واختراق اعمق. وعلى النقيض مع معجلات الجسيمات الثقيلة، تستخدم معجلات الالكترونات على نطاق واسع ليس فقط كأدوات بحث بيولوجية وانما كذلك كمصادر للعلاج الاشعاعي بالأشعة السينية والالكترونات. وقد خصصت معجلات كثيرة في أنحاء العالم للتطبيق البيولوجي والطبي. وتعتبر البيتاترونات والمعجلات الخطية ومعجلات فان دي جراف المعجلات الرئيسية التي تستخدم بكثرة في العلاج الاشعاعي كما تستخدم أنواع أخرى من المعجلات كمولدات للنيوترونات السريعة لعلاج الأورام كما سنشرح فيما بعد،

مزايا المعجلات في مجال العلاج الاشعاعي:

بالرغم من وجود بعض الأضرار في استعمال معجلات الطاقة العالية في محل الأجهزة التقليدية للأشعة السينية منخفضة الطاقة، مثل التكلفة الابتدائية ومشكلات الصيانة والتطوير، الا أن هذه الأضرار تُعادَل من وجهة النظر الطبيعية بالمزايا التالية:

١ ـ كلما زادت طاقة حزمة الأشعة السينية، فان الذروة لا تبقى عند السطح وانما تحدث عند عمق أكبر تصاعدياً داخل المادة المشععة. وهذا التأثير، الذي يعرف بالنمو (أو التعزيز)، يكون ذا قيمة في معالجة الاصابات العميقة الوضع وذلك بالتحصل على تقليل للتفاعل مع الجلد.

٢ ـ ان قوة اختراق الاشعاع تكون أكبر عند طاقات عالية منها عند طاقات منخفضة. ولهذا فبالنسبة لجرعة متساوية للاصابة العميقة الوضع تصير الجرعة المعطاة للأنسجة السطحية أقل للطاقات المتزايدة.

٣ ـ كذلك بسبب طاقة الاختراق الأعظم عند الطاقات الكبيرة تكون نسبة جرعة الورم الى الجرعة التكاملية أعلى.

٤ ـ عند استخدام حزم أشعة متعددة أو دورانية عند طاقة عالية، يمكن توجيه الحزمة نحو الاصابة عوضاً عن توجيهها الى نقطة أعمق من الاصابة، حيث ستحدث الجرعة الأعلى دائماً في المنطقة التي توجه اليها حزم الأشعة. إن هذا يسهل تخطيط العلاج.

٥ ـ إن المسح المستعرض يكون أقل للطاقة العالية عنه للطاقة المنخفضة، وهذا يعني أن حزم الأشعة ذات الطاقة العالية لا تشع إلا منطقة معينة بحدة. ويعتبر هذا عاملاً مشاركاً كذلك للبند رقم ٣ السابق.

٦ ـ يكون امتصاص الاشعاع عند طاقات عالية على الأرجح غير معتمد تقريباً على العدد الذري للمادة الماصة. لذلك فانه في معالجة الأنسجة بدلا من العظام تتلقى العظام إشعاعاً أقل نسبياً عند طاقات أعلى.

٧ ـ إن حزم الأشعة السينية ذات الطاقة العالية، التي عوضت جيداً، تنتج توزيعات للجرعة قابلة للحل فوراً حيث تكون مسطحات الجرعة المتساوية (isodose surfaces) منبسطة.

ويجدر بالذكر أن مدى اختراق الالكترونات في الأنسجة عند الطاقات المنخفضة (٥٠٠ ك ف على سبيل المثال) يكون صغيراً لدرجة أن العلاج بحزمة الالكترونات يكون غير عملي. وعند الطاقات العالية يكون لحزم الأشعة مزايا محددة.

فلأي مادة ماصة معطاة، تقتني الالكترونات مدى محدداً يكون بدلالة طاقتها. وفيما بعد هذا المدى تهبط الجرعة بسرعة فائقة الى كميـة مهملة. لذلك فانه بالتحكم في طاقة الالكترونات يستطيع المرء أن يتحكم في عمق الأنسجة الذي ستخترقه حزمة أشعة الالكترونات، وهكذا يُبقَى على الأنسجة المنتشرة

تحت الاصابة. وفي الوقت الحاضر يستطيع المعجل الخطي مسبقاً أن يقدم مثل هذا التحكم.

وكما في حالة الأشعة السينية العالية الطاقة فان مسطحات الجرعة المتساوية لحزم الالكترونات تكون منبسطة. وهنا كذلك لا يتوقف الامتصاص بشدة على العدد الذري للمادة الماصة، مع ملاحظة أن التعيين الفيزيائي للجرعة المتصة يكون أسهل بالنسبة للالكترونات منه للأشعة السينية العالية أو المنخفضة الطاقة.

العلاج الاشعاعي بالأيونات الثقيلة:

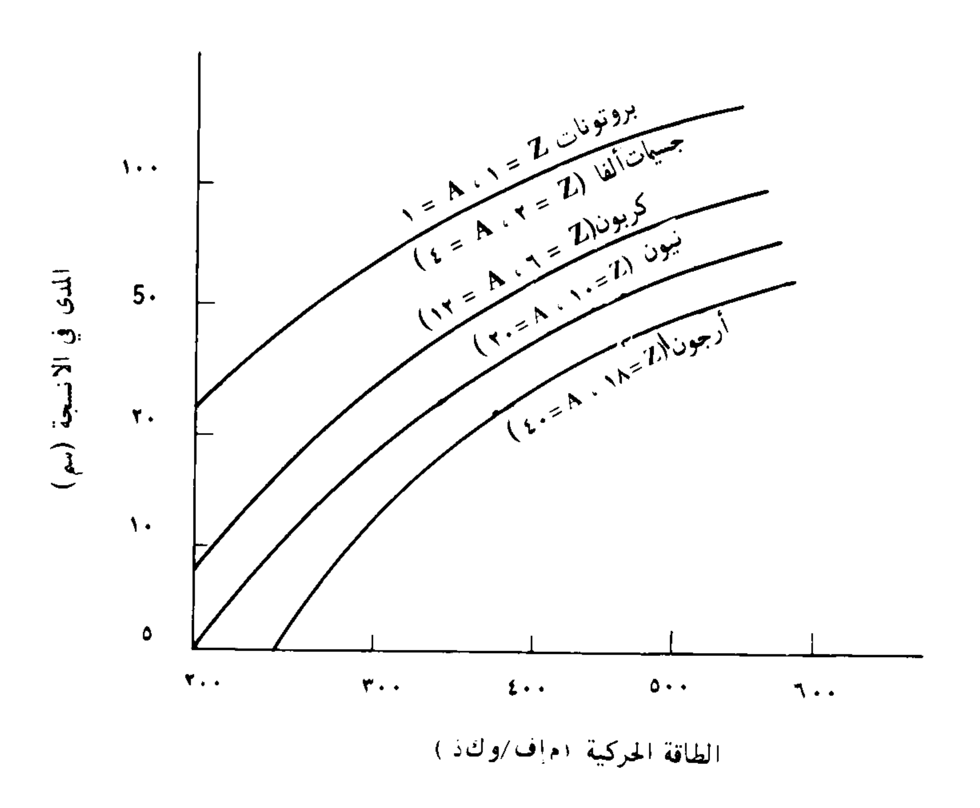
لقد أجريت دراسات على حزم أشعة الأيونات العلاجية باستخدام البروتونات وأيونات الهيليوم وأيونات الكربون وأيونات النيون. وفي هذا الصدد يتحدد التصميم الأفضل لنوع المعجل بفضائل الجسيمات وبطاقة حزمة الأيونات وكثافته. على أن الطاقة تتحدد بالمدى المطلوب وبالعدد الذري $ع_ز$ لحزمة الأيونات. ولقد صاغ «ليمان» والعاملون معه[٢١] هذه العلاقة في المنحنيات الموضحة بالشكل ٢ د ١. ويتفاوت المدى النموذجي للعلاج بين ٢٥ و٣٢ سم.

ومن ناحية أخرى يُشتق تصميم كثافات لحزم الأشعة من معدلات الجرعة المطلوبة وحجم العلاج. وأحد الأهداف هو ٢٠٠ راد/دقيقة في حجم: ٣٠ سم× ٢٠ سم للمقطع و١٥ سم للعمق. والكثافات التقريبية المناظرة للحزمة هي[٢١]:

الجسيم	بروتون	α	ك	نى
التدفق (ثانية$^{-١}$)	٢ر٥ × $١٠^{١٠}$	٦ر٢٥ × $١٠^{٩}$	١ × $١٠^{٩}$	٥ × $١٠^{٨}$

هذا، ويمكن أن تستخدم أنواع مختلفة من المعجلات مثل السيكلوترونات من النوع التقليدي أو المتساوي الديمومة، والمعجلات الخطية أو

السينكروترونات . ويتوقف اختيار نوع المعجل على تقديرات التكلفة التي تأخذ في الاعتبار امكانية القدرات الاضافية للمعجل مثل النظائر و/أو انتاج النيوترونات . ويجب هنا أن تجري دراسة دقيقة لاختيار وتصميم أجهزة معجل الأيونات الثقيلة للعلاج الاشعاعي (راجع على سبيل المثال المرجع ٢١).



شكل ٢ د ١ المدى في الانسجة مقابل الطاقة (مرجع ٢١)

النيوترونات السريعة من معجلات الطاقة المنخفضة في علاج الأورام:

على الرغم من التقدم الكبير الذي أحرز في تطوير أجهزة العلاج بالأشعة السينية والالكترونات، إلا أنه يوجد حالات كثيرة لا يكون فيها العلاج الاشعاعي هو العلاج الصحيح حيث أنه كما ذكرنا سابقاً يكون عدد لا يستهان به من الأورام مقاوماً بعض الشيء ضد التشعيع بالالكترونات أو الأشعة السينية بسبب التزويد الأكسجيني الرديء للخلايا في مركز تلك الأورام التي تعزل غالباً من التغذية العادية للأكسجين. ويظهر تأثير الأكسجين بجلاء شديد في قياسات الخلايا عندما يرسم بيانياً احتمال النجاة مقابل جرعة الأشعة السينية(٣٠)؛ هكذا نحصل على كمية من هذه الرسومات البيانية تعطي «نسبة تأثير الأكسجين ن ت أ» (Oxygen Effect Ratio «OER») التي تُعرّف على أنها النسبة بين الجرعات التي تقلل تعدادات الخلايا بمعامل مقداره ٢٫٧.

إن عواقب تأثير الأكسجين بالغة الخطورة في الممارسة الطبية (الاكلينيكية)، وحتى اذا كان التركيز المبدئي منخفضاً للخلايا ناقصة الأكسجين في الورم فهي سوف تهيمن عند نهاية العلاج الاشعاعي. ويلاحظ أن الجرعة الكلية يلزم أن تكون في أغلب الأحيان ضعف الجرعة في حالة ما اذا لم يكن هناك خلايا ناقصة الأكسجين، وهكذا تتفاقم مشكلة الحد من تدمير الأنسجة العادية القريبة من الورم.

لقد أظهرت مجموعة من التجارب(٢٢) بوضوح أن النقص في الأكسجين يزيد من المقاومة للأشعة السينية، وأن خلايا الورم يمكن أن تتحول من شكلها المقاوم الى الحساس وذلك بتعاطي الأكسجين، كما وجد أن احتواء المريض مغلقاً في خزان مضغوط بالأكسجين ليس عملياً من وجهات النظر جميعها.

العلاج بطريقة « نقل الطاقة الخطي » (ن ط خ) المرتفع:

(High Let Therapy)

ان استخدام اشعاع « ن ط خ » العالي يزودنا بحل أكثر شيوعا لمشكلة الخلية الناقصة الأكسجين. والواقع أن التجاوب البيولوجي لجسيمات « ن ط خ » العالي الثقيلة مختلف تماماً عن الأشعة السينية التي تحرر الكترونات ن ط خ منخفضة ثانوية في الأنسجة.

لقد كانت واحدة من طرق استغلال العلاج بنقل الطاقة الخطي العالي استعمال البروتونات بطاقة ١٨٠ م إف التي جربت ضد سرطان الحوض[٢٣]، وكان مدى اختراق ٢٠ سم مرضياً، ولو أن متوسط « ن ط خ » البروتونات كان شديد الانخفاض الا بالنسبة لمدى صغير جداً في « ذروة براج (Bragg peak) » عند نهاية المدى.

ويذكر هنا أن « ميزونات باي » بحوالي ٥٠ م إف قد نوقشت بجدية، حيث تعود ميزتها الى التحطيمات النووية العنيفة الناتجة عند نهاية مداها[٢٤]. على أن توزيع « العمق - الجرعة » لجسيمات ألفا ذات « ن ط خ » العالي والمحررة بامتصاص الميزونات في أنوية الكربون والأكسجين تبدو مشجعة للغاية، كما أن « ن ت أ » المتوسطة يُتوقع لها أن تكون منخفضة تماماً.

انه من الجلي أن التكلفة المرتفعة لهذه المعجلات العملاقة المطلوبة لانتاج هذا النوع من الاشعاع سوف تجعل هذا الأسلوب الفني قاصراً على معامل قومية قليلة.

النيوترونات الحرارية للعلاج بطريقة « نقل الطاقة الخطي » العالي:

لقد فحص امتصاص النيوترونات الحرارية[٢٥] على أنه وسيلة فنية ممكنة

★ تعتبر Let اختصاراً للتعبير Linear Energy Transfer والتي تكون مقياسا لمعدل فقد الطاقة على امتداد الأثر الذي يتركه جسيم مشحون عندما يمر داخل مادة.

للعلاج « بنقل الطاقة الخطي » العالي. وليس لحزم النيوترونات الحرارية اختراق كافٍ في الأنسجة من أجل الأورام العميقة الوضع، غير أن هناك دلالة جيدة لحزم النيوترونات « فوق الحرارية » التي رشحت بواسطة كادميوم ٢ ملي متر.

طب النيوترونات السريعة:

لعل تبرير استخدام النيوترونات السريعة في العلاج قد تأسس بصفة أولية على قمع تأثير الأكسجين وثانياً على التقليل في اتلاف العظام. وبالاضافة الى عيوب تشعيع « ن ط خ » العالي المذكور سابقاً، يلزم ملاحظة أن هذه الماكينات الباهظة الثمن تكون غير متحركة وهي لذلك ليست مريحة. لذلك فان النيوترونات لأسباب فنية واقتصادية وعملية تبدو أفضل الجسيمات صلاحية للتطبيقات الطبية اذا قورنت بجميع الأنواع الأخرى لاشعاع « ن ط خ » العالي. ويلاحظ أن الحزم المجمعة للنيوترونات السريعة بمتوسط طاقات فوق قلة من المليون فلط الكتروني يكون لها اختراق كافي في الأنسجة، كما أن لها قيمة لـ « ن ت أ » أقل بشكل محسوس عن الأشعة السينية. والميزة الأخرى للنيوترونات السريعة على الأشعة السينية أن الطاقة الممتصة بواسطة العظام أقل منها في الأنسجة الرخوة بسبب النسب المنخفضة للايدروجين في العظام. كذلك فان للنيوترونات السريعة تأثيراً استثنائياً للجلد حيث تكون الجرعة الممتصة في الأنسجة منخفضة عند السطح وتصل الى قيمتها القصوى عند مسافة قصيرة تحت الجلد حيث يوطد توازن الالكترونات الثانوية. كذلك يلزم ملاحظة أن النيوترونات السريعة، وعلى الأخص ذات طاقة ١٤ م إف، يكون لها عمق اختراق أعلى بكثير من تلك للأشعة السينية ٢٥٠ ك إف ولجاما كوبالت-٦٠.

انتاج النيوترونات السريعة:

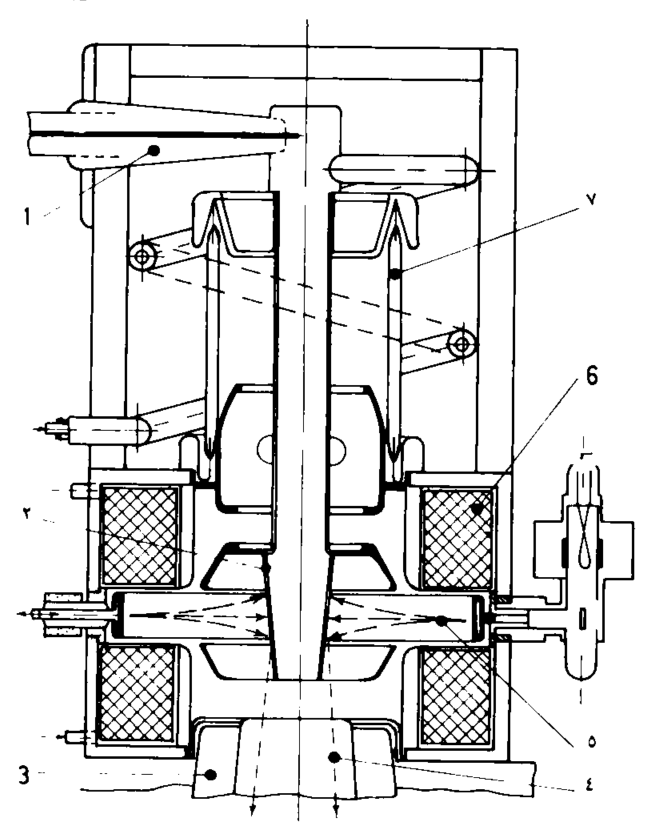
توجد وسائل قليلة لانتاج النيوترونات السريعة بكثافة كافية وبالطاقة المطلوبة للعلاج الطبي (الاكلينيكي). فمن المستطاع الحصول على النيوترونات بالانشطار السريع في المفاعلات، ومن التفاعلات الضوء نووية (جاما - نيوترون) باستخدام معجل خطي للالكترونات عالي الطاقة مع هدف ذي عدد ذري عال، ونيوترونات وحيدة الطاقة (من ٣ الى ٦ م إف) من تفاعل «ديوترون - ديوترون» باستخدام معجل جسيمات متوسط الطاقة (في مدى الـ٣ م إف). وقد وجد أن «نسبة تأثير الأكسجين» مناسبة في هذه الحالات.

والمصدر الاخر الهام لتوليد النيوترونات السريعة هو تفاعل ديوترون - تريتون مستخدمين معجلاً منخفض الفلطية بطاقة في مدى ١٥٠ - ٥٢٠ ك إف لتعطي نيوترونات ١٤ - م إف أحادية الطاقة. وهذا يعتبر مناسباً أكثر من مصادر النيوترونات الأخرى لتطبيقات العلاج العميق حيث يُطلب عمق ١٠ سم على الأقل الى نقطة الخمسين في المائة من الاضمحلال. وبالرغم من أن لها عيوباً كالعطاء القليل وعمر الهدف القصير، الا أن معجلات الفلطية المنخفضة تتميز بقلة التكلفة، والحركة الجيدة، علاوة على كونها مدمجة ومشاكل التشغيل والصيانة بها قليلة. ويوجد حالياً بعض الأنواع التجارية، مثل وحدة «هيفلي» للطب النيوتروني التي تتكون من أنبوبة محكمة الغلق لها فلطية تعجيل ٢٥٠ ك ف، وتعجل حزمة لخليط من أيونات الديتيريوم والتريتيوم من مصدر حلقي قطرياً نحو الداخل لتصدم هدفاً مخروطي الشكل من الديتيريوم والتريتيوم، مولداً بذلك نيوترونات ١٤- م إف من التفاعل.

ديوترون + تريتون - هـ^{٤} (٥ر٣ م إف) + نيوترون (١ر١٤ م إف).

ويُرى مقطع لأنبوبة النيوترونات في شكل ٢ د ٢[٢٦]. وعطاء النيوترونات ٥×١٠^{١٢} نيوترون/ ثانية مع قطر تقديري للهدف حوالي ٥ر٤ سم. هذا ومن

شكل ٢ د ٢ أنبوبة النيوترونات



1. High Voltage Cable. ١ - كابل الفلطية العالية
2. Target electrode. ٢ - قطب الهدف
3. Entrance aperture of Collimator. ٣ - فتحة مدخل المجمّع
4. Neutron beam. ٤ - حزمة النيوترونات
5. Concentric ion beam. ٥ - حزمة الأيونات المتحدة المركز
6. Magnet Coils. ٦ - ملفات المغناطيس
7. High Voltage insulator. ٧ - عازل الفلطية العالية

(Courtesy of Emil Haefely & CIE AG)

(باذن من إميل هيفلي وسي آي إي أي جي)

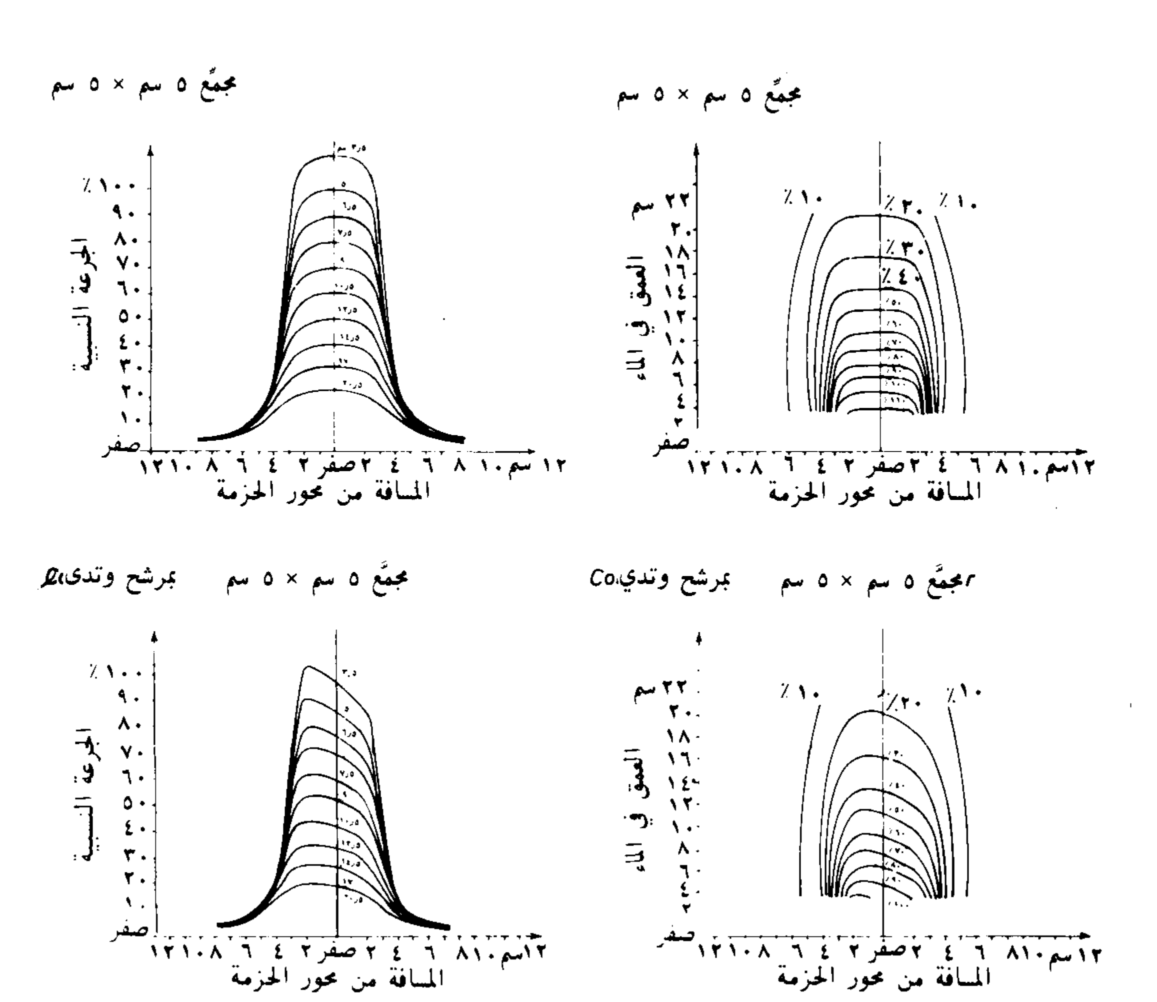
المستطاع تشغيل وايقاف التفريغ الغازي داخل أنبوبة النيوترونات ، وبالتالي النيوترونات الخارجة، وذلك بواسطة التحكم في جهد القطب الاضافي الحلقي ، بينما يمكن التحكم في عطاء النيوترونات بتغيير ضغط الغاز أو الفلطية العالية الانحيازية لتأكيد شدة ثبات المصدر .

ويجدر بالذكر أن الماكينة مزودة بالمجمعات المناسبة النظائرية للنيوترونات لحماية المريض من التعريض الكلي للجسم ، ومسند يهيىء رأس المصدر ، ويزوده بحركة متجانسة دائرياً للعلاج المتعدد المنافذ أو العلاج القوسي (Arc Therapy) .

ويُرى في شكل ٢ د ٣ بعض العينات لأشكال الجرعات الجانبية (dose profiles) ومنحنيات الجرعات المتساوية لوحدة نيوترونات هيفلي الطبية .

وحدة النيوترونات الطبية في « فيرميلاب » :

والنوع الآخر لوحدة النيوترونات التي تستغل معجلاً عالي الطاقة في هذه الحالة هو وحدة علاج السرطان بالنيوترونات في فيرميلاب بالولايات المتحدة الأميركية . لقد ركبت هذه الوحدة قريباً من المعجل الخطي ٢٠٠ ـ م إف حاقن المحطم الذري العملاق ٥٠٠ ـ ب إف . هذا وتنقل البروتونات ٦٦ ـ م إف المسحوبة من المعجل الخطي الى هدف البيريليوم الذي ينتج نيوترونات لعلاج المرضى . ويستخدم حاسب آلي دقيق الحجم (micro computer) ، موصل بمواجهة نظام تحكم المعجل الخطي ، لتأدية عملية اقتناء المعلومات وليتحكم في الوظائف المطلوبة لتشغيل الوحدة من نضد تحكم المعجل الخطي . ويجري حالياً التشغيل الروتيني للوحدة من أجل علاج المرضى من حجرة تحكم طبية محلية باستخدام نظام ـ ٦٨٠٠ ، « مؤسس بقرص » ، يشغّل من طرف لانبوبة أشعة المهبط (CRT Terminal) . وهذا النظام يزود الفني الطبي بعرض للمعلومات وتحكم للمتغيرات مما يعتبر ضرورياً لعلاج المريض ، متضمناً تجميع وتحديد



شكل ٢ د ٣ بعض عينات الشكل الجانبي للجرعة ومتساويات الجرعة في مثال مائي للورم. مسافة بين الهدف وسطح الماء ١٠٠ سم.
(باذن من اميل هيفلي وسي آي إى أي جي)

الجرعة التي يتلقاها المريض. ويلاحظ أن صورة « جامدة » لمتغيرات العلاج تولد كسجل للمريض وذلك في أعقاب اعطاء كل علاج جزئي. ولقد صمم نظام التحكم لهذه الوحدة العلاجية بحيث تضمن فصلاً كاملاً بين كل من التشغيل الروتيني الطبي والتشغيل العادي للمعجل الخطي.

لقد استمرت وحدة علاج السرطان تعمل منذ سبتمبر ١٩٧٦ عندما عولج أول متطوع وهو ضحية سرطان اللسان. ومنذ ذلك الحين استكمل عدد كبير من المرضى علاجهم، وتمت دراسات حقلية عديدة. وبعد خبرة سنتين تذكر تقارير علماء الطب في وحدة علاج السرطان أن النيوترونات أفضل من الأشعة السينية في علاج بعض أنواع السرطان[٢٧]. وخلال الدراسات الاسترشادية تضمنت أوضاع الأورام التي عولجت: الرأس، والرقبة، والمخ، البنكرياس، العظام، البطن، الثدي الجلد والصدر.

هذا ويمكن تقسيم أنواع العلاج الى: علاج بالنيوترونات وحدها، تعزيز بالنيوترونات بعد الاشعاع القياسي، وتشعيع نيوتروني كامل بعد معاودة في أعقاب علاج تقليدي، وتقترح الملاحظات المبدئية أن حزمة النيوترونات كوسيلة وحيدة للعلاج كانت عالية الفاعلية في التحكم بالأورام، كما كانت ردود فعل العلاج على الجلد معتدلة بصفة عامة.

المراجع

١ - «High Energy Physics at Argonne National Laboratory», A.V. Crew, D.R. Getz, R.H. Hildebrand, L.S. Markheim, D.A. Carlson, Book by Argonne Nat. Lab., Sep. 20, 1963.

٢ - «The Village Crier, The Fermi National Accelerator Laboratory News Bulletin», Special Issue on Discovery of the «Epsilon» Particle.

٣ - «The Expanding Role of the Small Van de Graff in Nuclear Nondestructive Analysis», A.E. Evans, Los Alamos Scientific Laboratory, Paper submitted to the National Particle Accelerator Conference, San Francisco, California, March 4-6 1973.

٤ - «Applications of Pulsed Neutrons from a Spallation Source», Samuel A. Werner, IEEE Trans. Sci, Vol. NS-24, No. 3, June 1977.

٥ - High Voltage Engineering Newsletter, Summer 1967, Vol 2, No. 3.

٦ - «The Accelerator-Breeder, an Application of High-Energy Accelerators to Solving our Energy Problems», P. Grand, K. Batchelor J.R. Powell, M. Steinberg, IEEE Trans. on Nucl.

Sci., Vol. NS-24, No. 3, June 1977.

«Future Trends in Application of Isotopes and Radiation», - ٧
Hellmut Glubrecht, IAEA Bulletin-Vol. 19, No. 6.

Booklet on «Actitron» Variable Energy Cyclotron by the - ٨
Accelerator Department of the Nuclear Scientific Instrument Group of Thomson-CSF, France.

«Development of Scanning Proton Microscopy», W.H. - ٩
Escovity, T.R. Fox, R. Levi-Setti, Proceedings of the Third Conference on Application of Small Accelerators, Vol. II, North Texas State University, Denton, Texas, October 1974, pp.125.

«Geochemical Analysis Using the Ion Microprobe Mass- ١٠
Analyzer», J.R. Hinthorne, The 1st International Symposium on Applied Methods of Local Microanalysis, Belgrade University, February 1978.

«Analyzing Traces of Elements in Some Geological Samples- ١١
by PIXE-Method», M.K. Pavicevic, the 1st International Symposium on Applied Methods of Local Microanalysis, Belgrade University, February 1978.

«The Heidelberg Proton-Microscope: A Powerful Tool for- ١٢
Non-destructive Element Analysis», B. Martin, F. Bosch, A. El-Gorsey, R. Noblility, B. Pohv. D. Schalm, K. Traxel, the 1st International Symposium on Applied Methods of Local Microanalysis , Belgrade University, February 1978.

«Solid State Surface Analysis by Ion Backscattering and- ١٣
Channeling», S.T. Picraux, Proceedings of the Third Conference on Application of Small Accelerators, Vol. II,

North Texas State University, Denton, Texas, October 1974, pp. 136.

«The Use of Ion Micro Probe in Industry», B.F. Phillips, - ١٤
Proceedings of the Third Conference on Application of Small Accelerators», Vol II, North Texas University, Denton, Texas, October 1974, pp 154.

Booklet on «Actitron» Variable Energy Cyclotron by the - ١٥
Accelerator Department of the Nuclear and Scientific Group of Thomson CFS, France.

«Analysis of Metallic Wear Products by Fast Neutron - ١٦
Activation», E.A. Kamykowski, E.J. Schneid, E.J. Kuene, and M.D.D' Agostino, Proc. of the Third Conf. on Applications of Small Accelerators, Vol. II, Industrial Applications, North Texas State University, Denton, Texas/ October 21-23, 1974, pp. 182.

«Neutron Accelerator Well Logging», D.W. Hilchie, Proc. of - ١٧
the Third Conf. on Applications of Small Accelerators, Vol II, Industrial Applications, North Texas State University, Denton, Texas/ October 21-23, 1974, pp 166.

«Carbon/ Oxygen/ (c/o) Log: Use and Interpretation», Paper - ١٨
No. 4639, Fall Meeting SPE (1973).

«Application of Low-Voltage, High-Current Accelerators in - ١٩
Tumor Therapy Research», M.R. Cleland and K.H. Morganstern, Proc. of the Conference on the Use of Small Accelerators for Teaching and Research, Oak Ridge, Tennessee, April 8-10, 1968, pp 390.

«Relationship Between Tumor Growth and Radiosensitivity», - ٢٠

J.A. Belli, and J.R. Andrews, J. Nat. Cancer Inst., 31, 689-703 (1963).

٢١ - «A Heavy Ion Facility for Radiation Therapy», Ch. Leemann, et. al. IEEE Trans. on Nucl. Sci., Vol. NS-24, No. 3, June 1977.

٢٢ - «The Radiobiology of Human Cancer Radiotherapy», W.B. Saunders and Co., Phila, Pa., (1968).

٢٣ - «Pilot Study on Proton Irradiation of Human Carcinoma», Falker, S. et. al. Acta Radiogias, 58, pp 33-51. (1962).

٢٤ - «Pi Mesons Versus Cancer», Fowler, P., 1964 Rutherford Memorial Lecture, Proc. Phys. Soc., 85, pp 1051-1066 (1965).

٢٥ - «Neutrons in Radiotherapy», Fowler, J., Proceedings of the International Atomic Energy Agency Symposium on Biological Effects of Neutron and Proton Irradiation (held at B.N.L.) Publ. IAEA, Vienna, Austria, Vol II, pp 185-214, (1964)

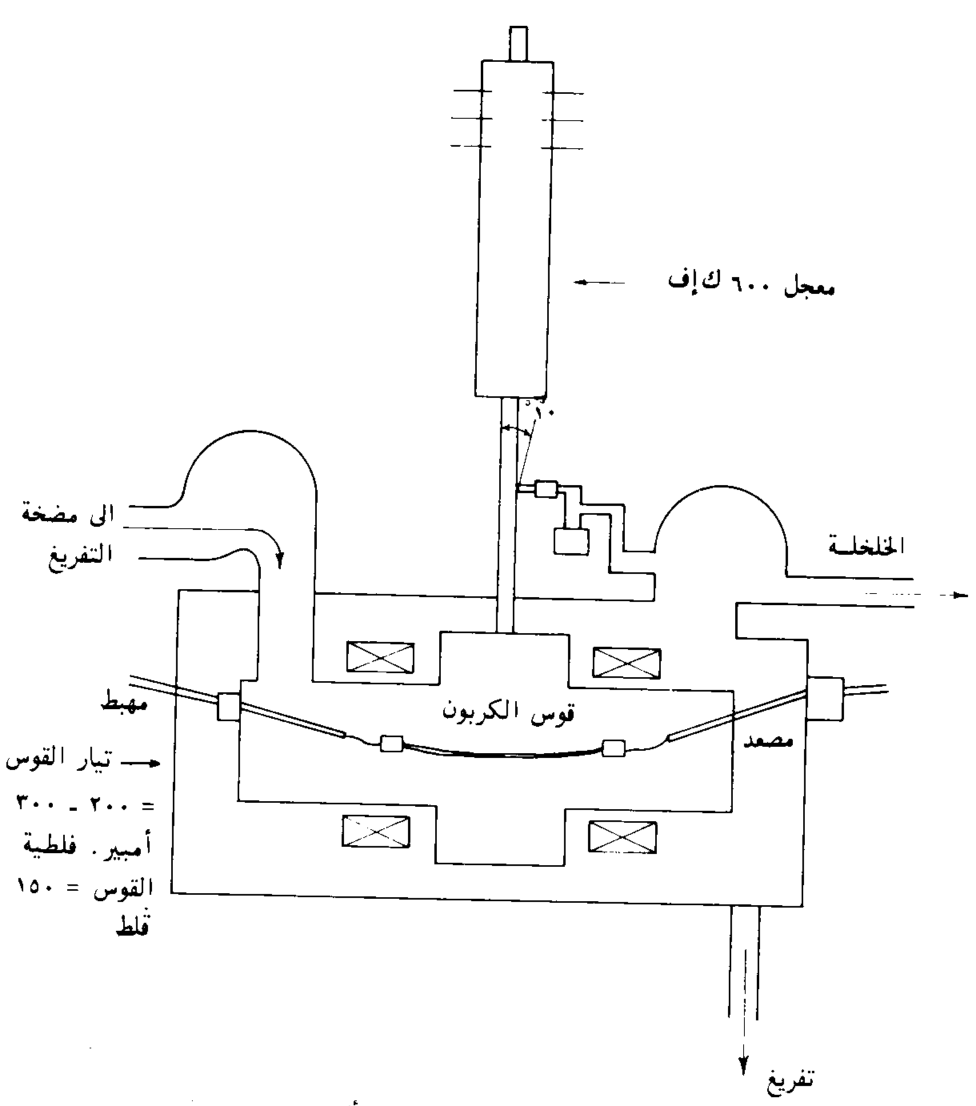
٢٦ - «The Haefely Neutron Therapy Unit, for the Application of Fast Neutrons in Clinical Radiotherapy», Emile Haefely & CIE Ltd, Basel/ Switzerland Booklet No. E 480.

٢٧ - «The Village Crier, Fermi National Accelerator Lab.», Vol. 9, No. 37, Sep. 22, 1977.

٢ هـ استخدام معجلات الجسيمات في بحوث الاندماج

تلعب معجلات الجسيمات دوراً حيويا في مجال الاندماج النووي الحراري، وتوجد طرق متعددة تستغل بها طاقة الجسيمات المعجلة إما لتسخين البلازما أو لتستحث الاندماج مباشرة.

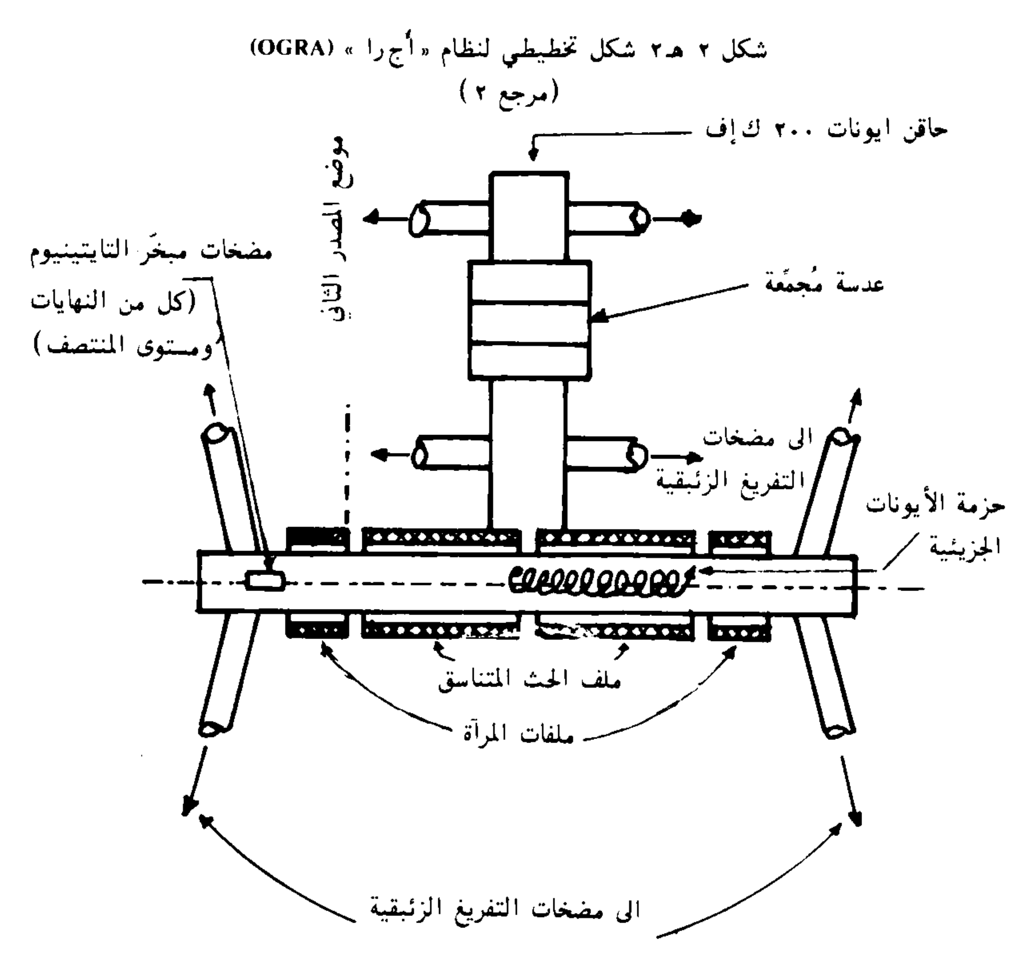
(١) في التجارب المبكرة طورت طريقة بمعمل «أوك ريدج» القومي بأمريكا في محاولة لحل مشكلة اشتعال البلازما، تلك هي التسخين المبدئي لخليط غاز الوقود من الديتيريوم أو الديتيريوم والتريتيوم كخطوة نحو انتاج تفاعل نووي حراري ذاتي التداوم. وتنطوي الطريقة على اصطياد حزمة أيونات معجلة من معجل حاقن طاقته مئات قليلة من الكيوفلطات الالكترونية في حاوي للمجال المغنطيسي وذلك بتغيير لنسبة الشحنة الى كتلة الجسيمات داخل المجال. ويقود ذلك الى تجميع تركيز عال للأيونات النشيطة والامساك بها الى أن تكون قد حصلت على الوقت اللازم لتنتشر عشوائياً في بلازما تم تسخينها واقعياً عند درجة حرارة قصوى عالية. وقد اختبرت طريقة الاشتعال هذه[١] بواسطة قذف أيونات الديتيريوم بطاقة ٦٠٠ ك إف في ماكينة تيار مستمر (دي سي إكس-«DCX-1»)حيث تمر خلال واحدة من تلك التفريغات الكهربية الخاصة، شكل ٢ هـ ١، وهي قوس كربون نشيط، هنا تُحتَبس الأيونات الذرية الناتجة بواسطة الانقسام في مسار مغلق بالقرب من المستوى المركزي للماكينة، بينما تترك محصلة الذرات المتعادلة والحزمة التي لم تنقسم المتبقية الماكينة في الحال. ويلاحظ أن الأيونات المحتبسة تكون في شكل حزمة عالية التنسيق، وأن أيونات هذه الحزمة تسبب تأين الغاز المتبقى في الماكينة، كما تصير حرارية بالتفاعل مع الألكترونات والأيونات الأخرى. والجهازان الرئيسيان المستخدمان لانقسام الأيونات الجزئية هي الـ «دي سي إكس-١ » (في أمريكا والـ «أ ج ر ا »(OGRA) في الإتحاد السوفييتي الذي يُرى تخطيطياً بالشكل ٢ هـ ٢[٢]. هنا تتكسر الأيونات الجزيئية ٢٠٠-ك إف على الغاز المكون للخلفية. وتحرف الحزمة الداخلة حوالي ٢٠° خارج مستوى



شكل ٢ هـ ١ تخطيط لماكينة « دي سي أكس - ١ »

المنتصف عندما تدخل وتخطىء اصابة البندقية في دورتها الأولى ، وبعد ذلك تدور حلزونياً نحو المرآة ؛ حيث يكون الحث غير متناسق في مناطق متعددة على طول المسار المنحني ، والحزمة الداخلة تتقدم حول المحور المغناطيسي .

شكل ٢ هـ٢ شكل تخطيطي لنظام «أُجرا» (OGRA)
(مرجع ٢)



ان المعجل الحاقن يقذف حقنة لأيونات يد$_{٢}^{+}$ بطاقة ٢٠٠ ك إف وتيار ٣٠ ملي أمبير. وهي تنتج بلازما للبروتونات بطاقة ١٠٠ ك إف عند كثافة $١٠^{١٣}$ جسيم للمتر المكعب تقريباً. وتعطي قياسات المسبار جهداً موجباً للبلازما قدره ١ الى ٣ ك إف مبينة بذلك درجة حرارة للألكترونات بحوالي تلك القيمة.

وبينما تكون هندسة هذه الأنظمة الكبيرة عملاً شاقاً هائلا («أُجرا» تبلغ ٢٠ متراً في طولها الكلي)، إلا أن هذا الأسلوب العام لانتاج بلازما ذات أهمية نووية حرارية يبدو مرجوا.

٢ ـ ان الطريقة الأخرى لاستخدام تسخين اضافي للبلازما يكون بحقن حزمة نشيطة من الجسيمات المتعادلة داخل البلازما. والميزة الرئيسية هنا هي أن الجسيمات المتعادلة يمكن أن تَعبُر الحث المغناطيسي وبذلك تستطيع من حيث المبدأ أن تدخل البلازما عميقاً داخل بناء المجال المحتجِز. على ان عيباً للحزم المتعادلة يتمثل في أن طول الممر لاحتجاز الأيونات يقيد بحجم البلازما. ومع ذلك يتم تزويد تسخين تكميلي في بلازما ساخنة ذات حجم كبير بواسطة حزم متعادلة ذات قدرة عالية.

يتكون حاقن الحزمة المتعادلة من مصدر أيونات، عمود تعجيل، المعادل، ومعدات أخرى مساعدة. وقبيل عملية معادلة الأيونات يُنَمي عدة أمبيرات من التيار في مدى الطاقة من ١٥ إلى ٦٠ ك ف وذلك في حاقنات الحزم المتعادلة الحالية. وتمر الجسيمات حالما تُعادَل دون أن تُحرف عبر المجال الحلقي للتوكاماك الذي يعتبر أعظم الأنظمة التي يرجى التعويل عليها مستقبلاً، والتي لا يكون فيها التسخين «الاومي» للبلازما الى درجات الحرارة النووية الحرارية كافياً. على أن قدرة حاقن الحزمة المتعادلة والتي تُرسَّب في البلازما تكون بالغة الارتفاع. ولقد كان جهاز الضاغطة الحلقية ثابتة الحرارة (adiabatic toroidal compressor) في برينستون بأمريكا أول ماكينة تستخدم التسخين بحقن الجسيمات المتعادلة. وحديثاً نقلت تقارير لنتائج مثيرة للاعجاب عن تسخين الأيونات بالحقن القوي للجسيمات المتعادلة في أجهزة التوكاماك الآتية: الـ «تي ـ ١١» (T ـ ١١) بالاتحاد السوفييتي، «أرماك» (ORMAK) في معمل أوك ريدج القومي بأمريكا، والـ «تي إف آر» (TFR) في «فونتيني أوروز» بفرنسا. وقد استخدمت قدرة حقن في مدى ١٠٠ ـ ٥٧٠ كيلووات، وذلك بتعدي الزاد الأومي (ohmic input). وقد لوحظ زيادة بمقدار الضعف أو ثلاثة أضعاف في درجة حرارة الأيونات، بالقيم القصوى حتى ٢ ك إف، وبزيادة قصوى في قيمة درجة حرارة الأيونات بحوالي ١ ك إف

بسبب الحقن (المراجع على هذه التجارب انظر على سبيل المثال المرجع رقم ٣). وفي مفاعل توكاماك الاختباري للاندماج[٤] : Tokamak Fusion Test Reactor «TFTR»)) الـذي تحت الانشاء في معمـل « برينستون » لفـيزيـاء البلازما ، سيكون مطلوباً من الحزمة المتعادلة أن تعطي جسيمات ديتيريوم ذات طاقة ٢٠ الى ٢٤ ميجاوات للبلازما لفترة ١/٢ ثانية ، وذلك بكفاءة للقدرة في التعادل قيمتها ٢٠ الى ٣٠ في المائة ، بينما تكون القدرة الكلية في الحزمة المعجلة ٨٠ ميجاوات ، وطاقة حزمة الجسيمات المتعادلة ١٢٠ ك إف.

٣ ـ الاحتواء الجمودي بواسطة حزم الالكترونات والأيونات :

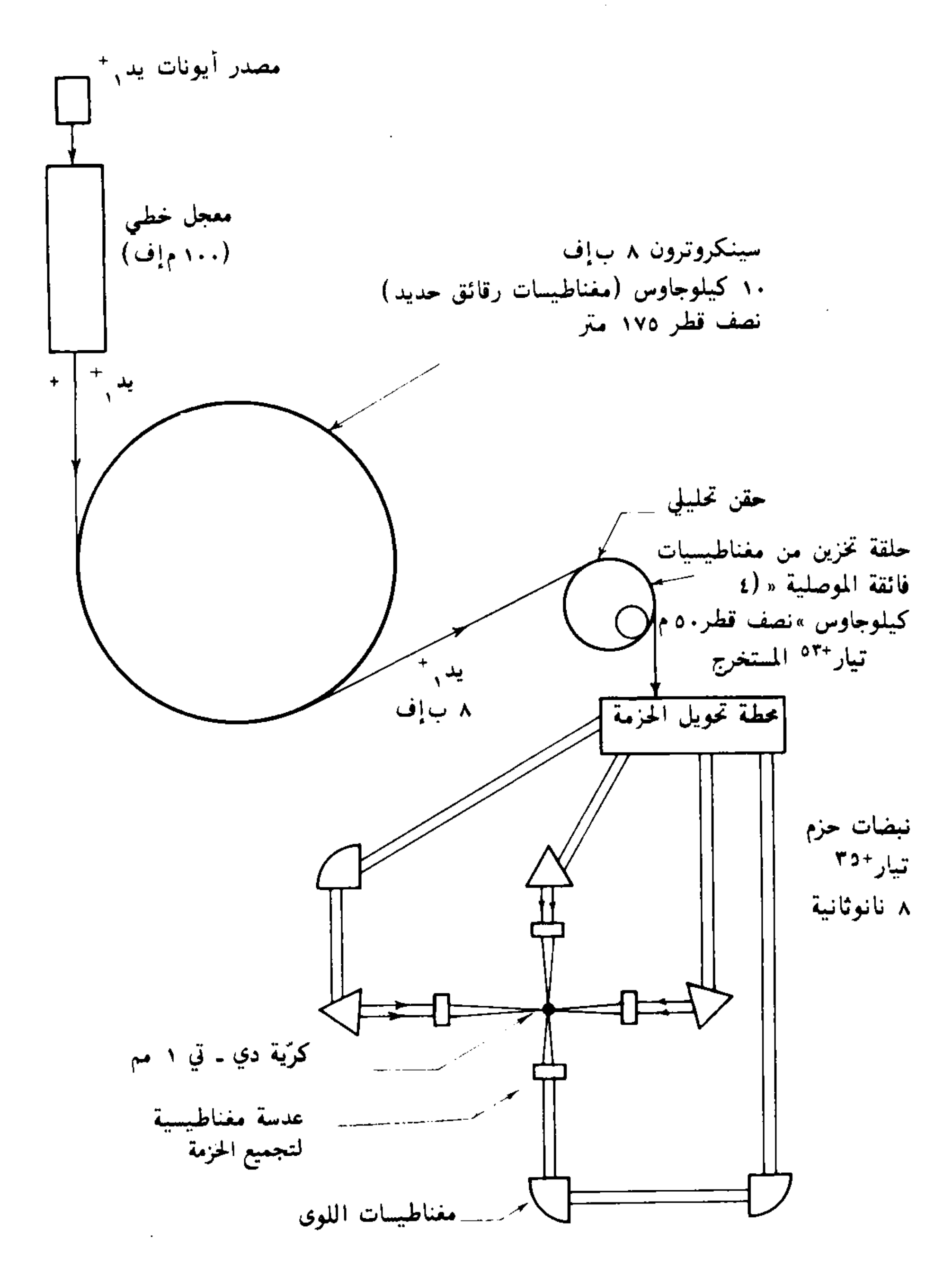
(Inertial Confinement by Electron and Ion Beams)

ان واحدة من الطرق الهامة لانتاج طاقة الاندماج والتي تشبه حزم أشعة الليزر ولكنها أكثر رجاء منها في الاحتواء الجمودي تتمثل في أن نستخدم حزماً عالية الطاقة للالكترونات أو الأيونات. وقد ولّد « رودافوك »[٥] أول اندماج سوفييتي مستحث بحزمة الكترونات في عام ١٩٧٦. كما أن معمل « سانديا » طوّر في عام ١٩٧٦ تصميماً جديداً لهدف أدى الى أول اندماج نووي حراري أمريكي مستحث بحزمة الكترونات . وقد أُسس هذا التصميم للهدف على أن يستحثّ مجال مغناطيسي في داخل الكريّة ، بما يساعد على تركيز الوقود المسخن المضغوط . ولعلها بالضرورة أكثر كفاءة ، ومن الجلي إمكان تصعيدها الى زيادات بمعامل أكبر من ١٠. ويبقى أن يرى ما اذا كان من الممكن تصعيدها الى مستويات المفاعل.

إن الفكرة الرئيسية لاندماج حزمة الأيونات كما يتصورها مارتن وأرنولد[٦] ، هي استخدام حلقة تخزين لأيونات عالية الطاقة بحيث يمكن ملؤها الى الحد الخاص بشحنتها الفضائية. ويلاحظ أن حزماً مختزنة بطاقات في حدود ملايين الجول يمكن تحقيقها في شكل نبضات دوامها قلة من النانوثانية ($١٠^{-٩}$ ثانية). وكمثل محدد لوحدة يتضح رسم تخطيطي لها في شكل ٢ هـ٣ ،

يُرى أن معجلا ذا قدرة على تعجيل يد$_1^+$ الى ٨ ب إف/أيون سيكفي لتحقيق التوازن («breakeven» كث. ح = ١٠^{١٤} سم$^{-٣}$ث ، حيث كث = كثافة الجسيمات ، ح = زمن الاحتواء) ، فـإذا ملئـت حلقـة التخزين (المستخـدمـة لمغناطيسيات مفرطة الموصلية) الى الحد الفضائي للشحنة فيمكنها تخزين ٤٠٠ كيلوجول من تيار الحزمة الموجب في شكل مائة نبضة دوارة ذات دوام قدره ٧ نانوثانية. ويمكن بهذا أن تخضع كرية ديتيريوم - تريتيوم بقطر ١ مم لاحتراق جسيم عندما تُصدم بمثل هذه النبضات(٧). ويساوي عطاء الطاقة على وجه التقريب طاقة حزمة الأيونات المخزونة.

ويكون عطـاء نيوترونـات الانـدمـاج في هـذه الحـالـة ٣ × ١٠^{١٧} نيوترون/نبضة. ومن المقترح أن نظام « حلقة واحدة » مع سينكروترون سريع الدورات يستطيع أن يعمل عند مستوى طاقة خارجة قدره واحد ميجاوات موضحاً بذلك حالة التوازن العلمي (scientific breakeven).



شكل ٢ هـ ٣ امكانية بحث لاندماج حزمة الايونات (مرجع ٦)

المراجع

١ - ORNL Report No. 2926, Thermonuclear Project Semiannual Report for Period Ending 31 January 1960, Office of Technical Services, Washington 25, D.C.

٢ - «Plasmas and Controlled Fusion», D. Rose and M. Clark, the MIT Press, P 403.

٣ - «Experimental Studies of Plasma Confinement in Toroidal Systems», H.Bodin, Reports on Progress in Physics, Vol. 40, No. 12, Dec. 1977, P 1500.

٤ - «Tokamak Fusion Research Reactor», Reference Design Report PPPL_1312, PH-R-004 Nov. 1976, Princeton University, Plasma Physics Lab., Princeton, N.J., U.S.A.

٥ - (See Fusion Magazine, 1_54, Dec. 1977_January 1978)

٦ - «Heavy Ion Accelerators and Storage Rings for Pellet Fusion Reactors», R. Martin and R. Arnold, RLM/RCA-1, Argonne Nat. Lab., Argonne, Ill., U.S.A., Feb. 9, 1976.

٧ - «Ion Beam Implosion of Fusion Targets». Physical Review Letters, Vol. 35, No. 13, P 848, Sep. 29, 1975.

٢ و استخدام المعجلات في الإجهارية الإلكترونية:

ان المجاهر الإلكترونية ما هي في الحقيقة إلا معجلات إلكترونات مشابهة لمعجلات الأيونات منخفضة الطاقة فيما عدا أن قطبية فلطية التعجيل العالية ـ المستمرة التيار ـ والتي توضع على «رأس» الفلطية العالية تكون سالبة، ويستبدل مصدر أيونات في المهجر الألكتروني ببندقية الألكترونات. وعلاوة على ذلك فإن السمة الأعظم أهمية في المجهر الألكتروني هي قدرة التبين التي تُحدَّد بصفة أساسية بالعوامل التالية:[١]

(١) استقرار فلطية التعجيل.
(٢) الدقة الميكانيكية والتفاوتات المسموحة للعدسات الكهرمغناطيسية.
(٣) غياب الحركة والاهتزاز سواء كانت مستحثة ذاتياً أو منقولة من الخارج.

وبسبب الحاجة الى التحرر من الاهتزاز، فإنه لا يمكن استخدام معجل الفان دي جراف كذلك لا يمكن استخدام المعجلات الخطية بسبب متطلبات الاستقرار. لذلك، ففي جميع المعجلات تقريباً، يُوصَى بالمولّد التعاقبي الذي عولج بالتفصيل في الباب الأول.

وتعمل المجاهر الألكترونية العادية التجارية عند فلطيات تعجيل من ١٠٠ إلى ٢٠٠ ك ف. على أنه كان من المقبول كقاعدة عامة أن التعبير مجهر الكتروني «عالي الفلطية» ينطبق على الأجهزة التي تعمل عند فلطية فوق ٥٠٠ ك ف.

ويجب أن يذكر مع ذلك أن المتخصصين في الاجهارية الالكترونية لم يكونوا قادرين على تعيين الفلطية الفضلى للاجهارية الألكترونية ذات الفلطية العليا. وهناك دائماً ميل نحو الطاقات الأعلى، وعلى الأقل لأجهزة البحوث. ذلك أن الزيادة في فلطية التعجيل تقدم ميزة أن تجعل من الممكن تحسين نقطة الثبات. وسيوجد من الناحية العملية أن قيم الثبات تكون حول

١٠ أنجستروم لمجاهر الألكترونات العادية، وعند حوالي ٥ أنجستروم لمجاهر الفلطيـة العالية ١ م ف، ونظرياً تحت أنجستروم واحد لأجهزة الثلاثة م ف.

وتسمح الطاقة العالية للحزمة الألكترونية باختراق العينات ذات السمك الأعظم والكثافة الأعلى. وتعتبر هذه الميزة على جانب من الأهمية في الفلزات (على الأخص في التصوير البللوري)، في البيولوجيا والبحث الطبي. وينبغي على المرء ملاحظة أن هناك فرقاً جسيماً بين مجهر الألكترونات العادي وذي الطاقة العالية. ففي الأخير يجب أن تستبدل البندقية الألكترونية بواسطة معجل إلكترونات كامل هو الذي يعطي الطاقة العالية المطلوبة للإلكترونات.

ولقد تم تحسين استقراريات المجاهر الالكترونية الى قيم قدرها ± ٥ × ١٠$^{-٦}$ أو حتى ± ١ × ١٠$^{-٦}$ كما لو قورنت بالقيم القياسية وقدرها ± ١ × ١٠$^{-٥}$.

على أنه قد تعزز جيداً أن الزيادات في فلطيات التعجيل قد وعدت بتحسين كل من اختراق العينة ودرجة الثبات. وعلى أمل زيادة كمية المعرفة المشتقة من الاجهارية الالكترونية بنيت مجاهر قادرة على تعجيل وتجميع الكترونات بطاقة تصل الى ٣ م إ ف وقد حددت خواص التصميم والتشغيل للمجاهر ذات ٥ م ف وأكثر. بل انه يجري بناء مجهر ١٠ ـ م ف في اليابان[٢]. وقد تم التغلب على الخواص المبدئية التي عاقت أجهزة الفلطيـة العالية: فالدوائر الآن مستقرة ويعول عليها، والصف المحوري لم يعد أكثر صعوبة من جهاز عادي، وأصبح التشغيل الآن بواسطة مستخدم المجهر عملياً.

ويجدر بالذكر أن تطبيقات المجاهر الالكترونية في المجالات المتعددة كثيرة لدرجة أنه يصير من المستحيل أن نعددها جميعاً. وسيذكر هنا البعض فقط كأمثلة لتوضيح أهمية تلك التطبيقات. ففي مختبر كافندش (كامبريدج بانجلترا) أجريت دراسات متوسعة على التخريب بالاشعاع الألكتروني، وفي ميدان التركيبات المغناطيسية في الرقائق السميكة، وبلورة الأسمنت. وقد خـدم مجهر كـافنـدش كنموذج أصـلي لطراز مليون فلـط (تصمـيم وبنـاء

« الصناعات الكهربية المشتركة » (Associated Electrical Industries).

والواقع أن الانجاز الياباني في الاجهارية الالكترونية كان مرموقاً، وبصفة خاصة يجدر بالذكر مساهمات « هاشيموتو »[٢] لنظرية التباين وارتباطها بتداخل الكترونات الفلطيـة العالية مع المواد المتبلورة. كذلك فإن العمل المثير بصفة خاصة هو ذلك الذي أجراه « تورن ايمورا » (جامعة نوجويا) الذي عرض صوراً متحركة أمكن أن يرى فيها تغيرا للمواقع في صلب السيليكون تحت الاجهاد المستعمل والمعين بخلية لحمل متناهي الصغر؛ وهكذا قيست سرعة الحافة وتغيرات المواقع الحلزونية.

وقد أوضح كل من فوجيتا بجامعة أوساكا، ولوليس بجامعة فرجينيا دراسات مستقلة عن بعضها التـأثيرات الرائعة لسمـك العينـة في دراسات ديناميكية الاسترجاع وإعادة البلورة في الألومنيوم وفي أكسدة التانتيلوم على التوالي. كمـا شرح « سوان » و« داف » في شركـة « يوإس » الميكـانيكيـة المعروفةَ للتآكل في سبائك الذهب ـ النيكل، ووصف « ماكين » بهارويل في انجلترا دراساته عن تخريب التزحزح الذري الناتج في النحاس بالتصادم الألكتروني عند طاقات أعظم من ٤٠٠ ك‌ف. وقد أعطي تدعيم مقنع لوجهة النظر التي تقول أن اجهارية الفلطيـة العالية الالكترونية تقدم فرصاً لاقتناء معلومات انشائية ذات أهمية في البيولوجيا تتجاوز كثيراً ما كان من المستطاع توقعه عند ١٠٠ ك‌ف وأقل. وهنا كانت بعض الصور التي قدمها « ك. هاما » (من مدرسة الطب بجامعة أوسكا) ذات أهمية خاصة. فقد أظهرت الصور الفوتوغرافية المأخوذة عند ٦٥٠ ك‌ف و١٠٠٠ ك‌ف عينات ثابتة ومتعمقة ومقطعية للقصبة الهوائية والعضلات والأنسجة الأخرى. كما أظهرت أزواج ستيريو من مقاطع سمكها (ميكرومتر أو أكثر اختراقاً مرضياً للحزمة ودرجة ثبات كافية لتقدم التركيبات « الثلاثية ـ الرقائق » لأغشية الخلية في وضوح زاهٍ ثلاثي الأبعاد.

وفي بحوث أجريت عند ٨٠٠ ك ف نجح « هاما » و« نجاتا » (بشركة هيتاشي) في عرض مسافات بحوالي ٠٫٤٥ مم في بللورات مرتكزة على مقاطع « إيبون » في أنسجة كان سمكها ١ ميكرومتر. وهكذا أمكن اظهار قدرات درجة ثبات الالكترونات عالية الطاقة التي تخترق ألواح البلاستك ذات السمك الكبير.

كذلك أجرى « هاما » و« ناجاتا » رسومات بيانية مأخوذة عند ٧٥ و٨٠٠ ك ف بمقاييس الكثافة لأغشية الخلية في أشكال متناهية الدقة لمقاطع « رفيعة » (٢٠ الى ٤٩ نانومتر) من أنسجة « ايبون » المطمورة. وقد أظهرت الرسومات البيانية للأشكال البالغة الدقة مظاهر جانبية حادة الوضوح ودرجات ثبات كبيرة عند الفولطية العالية.

وقد وُضِحَت مزايا الفلطيات العالية أكثر في الأشكال المتناهية الدقة لعضلات الأرنب والتي حصل عليها د. رايس (جامعة كارنيجي ميلون)، وفي الكروموزمات المقدمة بواسطة « هانزريز » (جامعة ويسكونسن)، ولعضلات الطيران في الحشرات مثلما حصل عليها ك. يوتر (هارفارد وجامعة كولورادو) وك. هام.

المراجع

١ - »Electron Accelerators for High_Voltage Electron Microscopy», G. Reinhold, Haefely Publication, International Symposium High Voltage Technology, Munich 1972.

٢ - H. Hashimoto: Second International Conference on High Voltage Electron Microscopy, Stockholm, April 14-16, 1971.

٣ - «High_Voltage Electron Microscopy», H. Nennet, et al. Excerpt from Science, Vol. 168, pp 506_507, 24 April 1970, E. Haefely Publication No BE 738.

الباب الثالث

الجوانب البيئية والفيزيائية
الصحية لمعجلات الجسيمات

مقدمة :

بالرغم من أن الأخطار الأشعاعية لها وجود في معجلات الجسيمات ، إلا أن هذه الأخطار ليست على هذا القدر من الخطورة كما في مفاعلات الأنشطار . اذ لا يوجد مثيل لحادث « فقد التبريد » الذي يحدث في المفاعلات ، والذي يمكن أن يؤدي الى تلوث خطير وجرعات اشعاعية قاتلة اذا لم يعالج بسرعة . ان المعجل يمكن ايقافه بسهولة ، أو يمكن قطع حزمة أيوناته ، وهكذا يوقف معظم اشعاعه في حالة وقوع حادث تعرض . وعلى عكس ذلك لو أن تسخيناً زائداً حدث لقلب المفاعل تحت ظروف خطيرة (مماثلة لحادث مفاعل « ثري مايل ايلاند » في بنسلفانيا بأمريكا) فإن سلسلة التلوث الناتجة تكون غير متوقفة على ايقاف المفاعل . على أن الموقف قد يكون مختلفاً مع ذلك في حالة معجل التوليد عندما يعمل بالاشتراك مع مفاعل انشطاري في نفس دائرة الوقود ، مثلما شرح في السابق .

٣ ـ أ جوانب الفيزياء الصحية لمعجلات الطاقة المنخفضة :

لقد أصبح معجل الطاقة المنخفضة مستخدماً على نطاق واسع لأغراض عديدة كما سبق أن فصلنا في الباب الثاني وذلك بسبب انخفاض تكاليفه والسهولة النسبية في تشغيله . وهذه الماكينات ، مثل جميع الماكينات ، تقدم

مكمناً للخطورة عندما تستخدم باهمال أو عندما يجري تشغيلها بأشخاص ناقصي المعلومات. ولكي نتجنب المجازفات الغير ضرورية يكون من المحتم إجادة تصميم المختبر المحتوي للمعجل وأن يكون جميع مستخدمي المعجل على دراية بجميع أنواع الأخطار.

قواعد الأمن الاشعاعي:

ان الهدف من تلك القواعد أن تُؤمن الحماية، والصحة والسلامة للأفراد مستخدمي المعجل أو القائمين بتشغيله، فضلاً عن الجمهور بالقرب من المعجل. وهناك حدود معينة يوصى بها في العادة بواسطة المنظمات المتخصصة الوطنية أو الدولية (مثل المجلس الوطني للحماية الاشعاعية والقياسات في الولايات المتحدة الأمريكية) من أجل التحكم في المواد ذات النشاط الاشعاعي. فبالنسبة للقائم بتشغيل معجل الطاقة المنخفضة ينطوي ذلك بصفة أولية على هدف التريتيوم المستخدم في توليد النيوترونات. ومن المقرر أن[1] جرعة الاشعاع المأخوذة من كل من مصادر إشعاعية مرخصة وغير مرخصة لا ينبغي أن تتجاوز الحدود المعينة في القواعد. وبالرغم من وجود فروق بسيطة بين التنظيمات المختلفة، فإن حدود الجرعة الاشعاعية المنصوص عليها في جميع القواعد تكاد تكون نموذجية. لذلك فإن الحدّ الأساسي للجرعة الاشعاعية الخارجية هو أن المتوسط السنوي للجرعة الاشعاعية «للجسم كله» ينبغي ألا تتجاوز ٥٠٠٠ ملي ريم، أو متوسطاً اسبوعياً قدره ١٠٠ ملي ريم للتحكم في التعاطي، أو متوسط قدره ٢ر٥ ملي ريم/ساعة لأغراض التصميم. وعلاوة على ذلك فإن الحد الأساسي للجرعة الاشعاعية الداخلية هي أن كمية المادة المشعة في الجسم يجب ألا ينتج عنها جرعة اشعاعية تزيد عن الحدود المقبولة. وتكون هذه الكمية ١٠٠٠ ميكروكوري بالنسبة للتريتيوم، على شكل ماء.

وسيُناقش فيما يلي صنفان للأخطار الإشعاعية.

٣ أ ١ مخاطر الإشعاعات الخارجية :

أ ـ النيوترونات :

لعل أشد مصدر للأخطار أهمية في هذه الحالة هو النيوترونات التي تولّد بأن يصدم هدف الديتيريوم أو التريتيوم بالديوترونات . ويكون متوسط طاقة النيوترون من التفاعل : ديتيريوم (د ، ن) هـ٣ ٦ر٢ م إف . ويعطي التفاعل تر (د ، ن) هـ٤ نيوترونات ذات ١٤ م إف . ويتوقف الفيض النيوتروني على تيار الحزمة ، وجهد التعجيل وخواص الهدف . والنتاج النموذجي بما يقدر بـ ١٠^٨ الى ١٠^٩ نيوترون/ثانية يعتبر عادياً للتفاعل ديتيريوم (د ، ن) هـ٣ ، و١٠^١٠ الى ١٠^١١ نيوترون/ثانية للتفاعل تر (د ، ن) هـ٤ .ولقدقيست قيم[٢] مقدارها ١٠^٨ نيوترون/سم٢ ـ ثانية لكثافة فيض النيوترونات الحرارية عند ٢ سم من مصدر ١٠^١١ن/ثانية لنيوترونات ١٤ م إف محاطة بمكعب ٢٤ بوصة من البرافين .

وفيا يتعلق بالجرعة الاشعاعية فإن التعبير عنها يكون بوحدات لكثافة الفيض النيوتروني حيث هذه هي الوحدة المستخدمة في معظم حسابات التحجيب النيوتروني وفي كثير من القياسات الاشعاعية . ويعطي جدول « ١ » الكثافة المقبولة لفيض النيوترونات واعتمادها على طاقة النيوترونات

وتحجيب معجل منتج للنيوترونات هو أمر بالغ الأهمية حيث الاعتماد على المسافة وحدها لتحقيق التقليل المنشود للفيض يكون غير عملي . فعلى سبيل المثال يكون معدل الاشعاع عند متر واحد من مصدر ١٠^١١ ن/ث لنيوترونات ١٤ م إف حوالي ٢٠٠ ريم/ساعة ، وتكون المسافة المطلوبة لتقليل الجرعة الاشعاعية الى ٥ر٢ ملي ريم/ساعة هي ٢٨٠ متر .

ان النيوترونات ١٤ م إف هي الأكثر استخداماً في الغالب ، وبسبب نتاجها العالي وطاقتها المرتفعة تُبنى حسابات التحجيب في المعتاد على أساس أحوال نتاج النيوترونات ذات طاقة ١٤ م إف .

جدول (١)

متوسط كثافة فيض النيوترونات لتعطي ١٠٠ ملي ريم في ٤٠ ساعة

طاقة النيوترون (م إف)	نيوترونات/سم^{2} - ثانية
حراري	٦٧٠
٠ر٠٠١	٥٠٠
٠ر٠٠٥	٥٧٠
٠ر٠٢	٢٨٠
٠ر١	٨٠
٠ر٥	٣٠
١ر٠	١٨
٢ر٥	٢٠
٥ر٠	١٨
٧ر٥	١٧
١٠ر٠	١٧
١٠ - ٣٠	١٠

بالرغم من أن عدة طرق قد استخدمت لحساب احتياجات تحجيب مختبر مولد نيوترونات ١٤ م إف، إلا أن وسيلتين فنيتين رئيسيتين تستخدمان في العادة. **الأولى هي** طريقة «مقطع الازالة»[٣] التي تستخدم العلاقة.

معدل طا = Φ صفر . ج . ب $e^{-\Sigma_r}$ م

حيث Φ صفر = كثافة الفيض النيوتروني بدون تحجيب (ن/ سم^{2} - ث)،

ج = الجرعة لوحدة الفيض (ملي ريم/ ساعة لكل نيوترون/ سم^{2} - ث)،

ب = معامل النمو،

Σ_r = مقطع الازالة للنيوترونات ١٤ م إف (سم$^{-1}$)
م = سمك التحجيب (رسم)

وكما هو مبين في المرجع (٤) فان الصعوبة مع هذه الطريقة أن معاملات النمو ومقاطع الازالة تتغير مع سمك التحجيب نظراً لطيف النيوترون المتغير. ولقد أُوصي بمعامل نمو قدره خمسة[٣] لثخانات تحجيب أكبر من ٢٠ سم. وعادة تجدول قيم مقطع الازالة[٤] لمواد تحجيب مختلفة.

والطريقة الثانية [٥، ٦] تستخدم ثوابت معينة تجريبياً، و ،وأطوال استرخاء λ (relaxation length) في العلاقة

معدل طا = معدل طا$_{صفر}$ و $e^{-\frac{م}{\lambda}}$ ،وذلك لقيمة م >١٥ سم

ومرة أخرى، تجدول قيم λ، وعادة لقيم مختلفة لطاقات النيوترونات في مواد تحجيب مختلفة[٥].

ولقد كانت الخرسانة مادة شائعة للتحجيب النيوتروني بسبب انخفاض تكلفتها ،ولخواصها الانشائية، وسهولة تصنيعها. وستتوقف المتطلبات الصحيحية للتحجيب على كل جهاز على حدة، ومع ذلك فان ١٥٠ سم من الخرسانة تعتبر بصفة عامة كافية لمعظم الأجهزة المنتجة لنيوترونات ١٤ - م إف عند نتاج قدره 10^{10} ن/ ث على وجه التقريب.

يوضع في الغالب مادة مهدئة حول مجمع الهدف من أجل انتاج نيوترونات حرارية، ويخدم هذا المهدىء كدرع اضافي. ويمكن ان تؤدي الأنفاق والفراغات ومواقع الوصلات في التحجيب الى تسرب حزم الاشعاع، لذلك ينبغي تجنب الفتحات أو جعلها متمايلة. إن مدخلاً مُربكاً أو متعرجاً يغني عن باب كبير مدرع. كما أن شغل المناطق المحيطة بمختبر المعجل بالذات ينبغي أن يؤخذ في الاعتبار عند تقدير المعاملات الضرورية لتقليل الجرعة.

ب ـ الأشعة السينية:

يمكن انتاج الفوتونات (الأشعة السينية) بواسطة معجلات الطاقة المنخفضة عندما تصدم الالكترونات المعجلة أهداف مادة لها عدد ذرى عالي. كذلك يمكن انتاجها أثناء التصفيف الطولي للحزمة، وانتاج النيوترونات ودراسات التشتت أو أي عمليات أخرى تتعلق بالحزم الأيونية الموجبة. وأحياناً تصدم الجسيمات المعجلة غازات متخلفة أو أجزاء داخلية للمعجل منتجة لذلك الكترونات يتم تعجيلها خلفياً نحو القطب الموجب، حيث تتداخل وتنتج أشعة سينية. وستعتمد خواص الأشعة السينية على جهد التعجيل، وبناء القطب أو الهدف، وتيار الحزمة. ويكون طيف طاقة الأشعة السينية مستمراً وله طاقة قصوى مساوية لجهد التعجيل المأخود في الاعتبار.

وعندما يتعلق الأمر بمعجلات حزمة الالكترونات فان المستوى الاشعاعي للأشعة السينية يكون كثيفاً. وقد أعطى الفان دي جراف[٢] ٤٠٠ ك ف الذي عجل ١٠٠ ميكروأمبير من الالكترونات معدل تعرض قدره ١٠٠ روينتجن/ساعة عند ١ قدم من الهدف.

هذا وستعتمد كثافة الأشعة السينية المنتجة بواسطة الكترونات التيار الخلفي على هندسة أنبوبة التعجيل وعلى التفريغ وأحوال تجميع الحزمة، وعلى ما اذا كان المعجل مجهزاً بحلقة قمع (suppressor ring). ولقد لوحظت مستويات اشعاعية قريباً من «الطرف» وذلك في المدى من واحد ملي روينتجن/ ساعة الى ٢٠٠ روينتجن/ ساعة[٢، ٧، ٨].

وفيما يتعلق بالتحجيب للأشعة السينية، سيكون كافياً لو أن تحجيب المعجل قد صمم للوقاية ضد نيوترونات ١٤ م إف، والا فان متطلبات التحجيب يمكن أن تحسب بطريقة مماثلة للتحجيب الابتدائي لأجهزة الأشعة السينية التقليدية[٩]. وفي معجل فان دي جراف ٤٠٠ ك ف[٦]، اذا استعمل «قيمة سمك النصف» قدره ١٫٣ بوصة من الخرسانة لأشعة سينية ٤٠٠ ك ف

عالية الترشيح فان حوالي $\frac{1}{4}$ ١٤ بوصة من الخرسانة تكون مطلوبة لتقليل معدل التعرض الى ٢ ملي روينتجن/ ساعة عندما يقع الهدف عند مركز غرفة ١٠ قدم× ١٠ قدم. هذا ويمكن تقليل الكترونات التيار الخلفي بوضع جهد سالب قدره ٩٠ فلط على حلقة قمع. وسيكون ذلك كافياً لرد معظم الالكترونات المتولدة في منطقة الهدف ومنعها من دخول أنبوبة التعجيل. ان فقد هذه الفلطية لحلقة القمع سيزيد المستوى الاشعاعي.

ج ـ نواتج التنشيط:

ان تنشيط أجزاء المعجل سيحدث أثناء انتاج النيوترونات. وسيكون الاشعاع المؤخر من نواتج التنشيط هذه متواجداً بعد ايقاف المولد. وتحدث تفاعلات التنشيط بصفة ابتدائية في مواقع ذات فيض نيوتروني عالي، كما في مجمع الهدف وخلفيته. وفي المعتاد تُبنى معظم مجمعات الأهداف من الألومنيوم.

والتفاعلات التي يمكن أن تحدث هي:

لو^{٢٧} (ن، بروتون) مغ^{٢٧}، لو^{٢٧} (ن، γ) لو^{٢٨}، وكذلك لو^{٢٧} (ن، a) ص^{٢٤}. ويلاحظ أن المغنسيوم ـ ٢٧، والألومنيوم ـ ٢٨، والصوديوم ـ ٢٤ باعثة لأشعة بيتا ـ جاما بأعمار نصفية قدرها ٩ر٥ دقيقة، ٣ر٢ دقيقة، ٩ر١٤ ساعة على التوالي. ويعتبر النحاس المادة السائدة لخلفية الهدف.

وتفاعلات التنشيط في النحاس هي:

نح^{٦٤} (ن، ٢ ن) نح^{٦٢}، نح^{٦٥} (ن، ٢ ن) نح^{٦٤}، نح^{٦٣} (ن، γ) نح^{٦٤}، نح^{٦٥} (ن، γ) نح^{٦٦}. والنحاس ـ ٦٢ باعث بوزيترونات بعمر نصفي قدره ٧ر٩ دقيقة ونحاس ـ ٦٤ الباعث للبوزيترونات كذلك له عمر نصفي ٦ر١٢ ساعة؛ ونحاس ـ ٦٦ له عمر نصفي ١ر٥ دقيقة ويضمحل بانبعاث بيتا ـ جاما. ويمكن

كذلك أن يحدث تنشيط النيوترونات في أجزاء أخرى من المعجلات ، ولكن الى مدى أقل .

وعلاوة على ذلك ، سيحدث تنشيط الأكسجين في الهواء المجاور وفي مياه التبريد ، أ١٦ (ن ، بروتون) نيتروجين ١٦ لدرجة أن نيتروجين١٦ يشع جسيمات بيتا عالية الطاقة (طا قصوى = ٤ر١٠ م إف) وأشعة جاما (طا = ١٣ر٦ م إف) . إن نصف عمر هذه النويدة ٣٥ر٧ ثانية ؛ لذلك فان تأثيراتها الاشعاعية تكون مهملة خلال دقيقة بعدالايقاف . وقد استخدم التنشيط المستحث في مياه التبريد لاستنباء نتاج مولد النيوترونات[١٠] . ويمكن أن يكون المستوى الاشعاعي الكلي الناتج من تنشيط النيوترونات السريعة حوالي ٣٠٠ ملي رونتجن/ ساعة بالقرب من الهدف بعد وقف المولد . فاذا كانت النيوترونات الحرارية موجودة فسيحرز على مستويات أعلى . ونظراً للأعمار النصفية القصيرة للعديد من نواتج التنشيط هذه فان الاشعاع المؤخر سيتناقص الى حوالي نصف قيمته الابتدائية خلال ١٠ دقائق بعد أن يتوقف انتاج النيوترونات .

هذا وسيعطي تحجيب النيوترونات وقاية كافية من الاشعاع الناتج عن التنشيط وذلك أثناء تشغيل مولد النيوترونات . ويجب تأجيل العمل على مجمع الهدف لعدة دقائق ، وأن تستخدم أدوات لمناولة الأجزاء المنشّطة لتقليل تعريض الأيدي .

د ـ « أشعة الفرملة » من الأهداف :

إن جسيمات بيتا المنخفضة الطاقة (طا قصوى = ١٨ ك إف) المنبعثة من التريتيوم لا تشكل بذاتها خطراً إشعاعياً خارجياً ، ومع ذلك فان تفاعل جسيمات بيتا هذه مع التايتينوم والنحاس المستخدم كخلفية للهدف سينتج « أشعة الفرملة » (أشعة سينية) بطاقة قصوى ١٨ ك إف . ومع ان جزءاً

صغيراً فقط من طاقة اضمحلال بيتا يعاد انبعاثه على شكل أشعة سينية ، فان هذه الاشعاعات تكون أكثر اختراقاً ويمكن أن تصير خطراً اشعاعياً خارجياً بالقرب من سطح الأهداف ذات الكوري المرتفع.

لقد قيست[11] معدلات التعرض لأشعة الفرملة بما يقدر بـ ٧ر١ ملي رونتجن/ ساعة ـ كوري عند ١٠ سم من المصدر. ومرة أخرى ، تستخدم أدوات لمناولة أهداف التريتيوم لتقليل تعريض الأيدي. ويجب أن تعلن اشارات للانذار للتعريف بمناطق الاشعاع الخطرة. ويجب أن يرفق بالاشارات القواعد التي تحكم الأنشطة في المنطقة. كما ينبغي أن يُنشّط ضوء انذاري عندما يعمل المعجل.

هذا ويتطلب التحكم أن توضع دائرة تعشق (interlock) بحيث توقف حزمة الأيونات من ضرب الهدف عندما تعاق ، أو تزيل الفلطية العالية. وبهذه الطريقة تقلّل المستويات الاشعاعية لعالية الى ما تحت ١٠٠ ملي راد/ ساعة. ويجب أن تعمل دائرة التعشق مع الباب عند المدخل الى منطقة المعجل.

٣ ب مخاطر الاشعاعات الداخلية:

أ ـ أهداف التريتيوم:

تمثل أهداف التريتيوم المستخدمة في توليد النيوترونات مكمناً للتلوث وخطراً ممكناً للاشعاعات الداخلية. وفي المعتاد تحتوي الأهداف على غاز التريتيوم بمقدار يتراوح بين ١ و٣٠ كوري ممتصة في التايتينيوم. ويُبخّر التايتينيوم في طبقة رقيقة (٣٠٠ الى ١٠٠٠ ميكرو جرام/ سم^{2}) على خلفية نحاس. وتُطور وسائل فنية متقدمة لأهداف أكثر نشاطاً[12] ولما كان ديوترون واحد من ١٠٠٫٠٠٠ يتفاعل مع التريتيوم لخلق نيوترون ، فان تفاعل الديوترون ـ تريتون يستخدم أقل من ١٪ بكثير من كل التريتيوم المفقود من الهدف. وسوف يصاد معظم التريتيوم بواسطة المضخة الأيونية ، أو مضخة

الزيت (أو الزئبق) الانتشارية ثم يخرج كعادم في الجو.

ويذكر أن أكسيد التريتيوم الذي يُمتص بواسطة الجسم بمعدل أسرع كثيراً من الغاز[١٣] يعتبر كخطر أعظم من كمية مكافئة من غاز التريتيوم. ومع أن حوالي ٩٩٫٨٪ من التريتيوم الذي يفرغ من معجل منخفض الطاقة يكون في الشكل الغازي، الا أن الافتراض يوضع عادة بأنه أكسيد التريتيوم نظراً لأن غاز التريتيوم سيتفاعل ليكون أكسيد التريتيوم. ولقد وجد [١٣] أن الكثرة التي يدخل بها اكسيد التريتيوم الجسم خلال الجلد تكون بقدر ما يدخل خلال الرئتين وذلك في محتوٍ على نشاط ما لوحدة الحجم. ويكون متوسط الداخل خلال الجلد حوالي ١٠ ميكروكوري/ دقيقة في تركيز للهواء مقدره ١ ميكروكوري/ لتر هواء[١٤].

ب ـ العادم من مولد النيوترونات:

يتوقف مستوى التريتيوم في العادم من مولد النيوترونات على نوع نظام ضخ التفريغ المستخدم. وفي حالة مضخة زيت انتشارية تساندها مضخة دوارة لما قبل التفريغ يطرد معظم التريتيوم كعادم خلال المضخة الأمامية. على أن استخدام جهاز غسل غاز التريتيوم[١٥] يقلل مستوى التريتيوم بمعامل قيمته ٢٫٣٥ × ١٠ ^٤^. ومن ناحية أخرى، اذا استخدمت مضخة أيونية فإن معظم التريتيوم سيصاد على الأسطح الداخلية لأقطاب المضخة. واذا ما تزايدت سخونة المضخة فان طرداً غازياً (outgassing) متزايداً يمكن أن يحدث مع تحرير لاحق للتريتيوم

ج ـ تلوث المضخات والزيت:

ان مشكلة الصيانة في حالة المضخات الأيونية التي يكون عمرها من ١٠٫٠٠٠ الى ٤٠٫٠٠٠ ساعة أقل قسوة منه في حالة مضخات الزيت الانتشارية. ومع ذلك تحتوي المضخات الأيونية على مستويات عالية من النشاط

ويجب أن تُخدم بواسطة الأفراد المؤهلين فقط الذين يفهمون مكمن الخطر والمجهزين بمعدات الأمن الضرورية. ومن ناحية أخرى تتعلق خدمة المضخات الانتشارية أو المضخات الأمامية بتحرير التريتيوم المحتبس في الزيوت. على أن العد الوميضي السائلي يستخدم عادة في التقدير التقريبي لمحتوى التريتيوم في الزيت. وقد وجد أنه في المتوسط[١٦] يظهر زيت المضخة الأمامية تركيزاً مقداره ١٠ الى ٢٠ مرة أعظم مما يوجد في زيت المضخة الانتشارية.

هذا، وينطوي تغيير الهدف على التلوث والاستيعاب الممكن للتريتيوم بواسطة الأفراد نظراً لأن الهدف وأجزاء أخرى من المعجل تصير ملوثة أثناء تشغيل الماكينة.

ولقد طوّرت وسائل تقنية عديدة وأجهزة لازالة أو تقليل العديد من المشاكل المتصلة بدورة الهدف. وفي المرجع (٤) يُعطى مسحٌ لمثل هذه الوسائل الفنية التي تقدم كذلك تحليلا لأخطار اشعاعية أخرى داخلية مثل تخزين الهدف، الانتشار داخل البلاستيك والامتصاص من الأسطح.

الاستنباء

يوجد ثلاثة أنواع من الاستنباء:

(١) استنباء الهواء:

ان الصعوبة في استنباء التريتيوم تكمن في أن طاقة جسيمات بيتا المنبعثة صغيرة لدرجة أنها لا تخترق حتى فتحة رقيقة لأنبوبة. وعلى وجه العموم فان كاشفات التريتيوم التي تكون من نوع «غرفة ـ التأين» لا تكون قادرة على التمييز بين الاشعاع من التريتيوم وأي اشعاع آخر في المنطقة. والواقع أن عديداً من الأنواع التجارية متوفر ويعتمد مبدؤها على جذب الهواء من الجو خلال غرفة تأين. وتكبّر دائرة الكتروميتر تيار غرفة الأيونات وتُعرض

النتائج على جهاز قياس. كما يجري تزويد لازالة الغبار وأبخرة الدخان التي يمكن أن تعطي نتائج خاطئة.

وهناك أنظمة أخرى أكثر حساسية تنطوي على تمرير أحجام مقاسة من الهواء في الماء على شكل فقاعات، وبعد ذلك يُقاس النشاط في الماء بواسطة العد الوميضي السائلي.

(٢) استنباء السطح:

تستخدم المسابير (probes) للكشف عن تلوث التريتيوم عندما يتم تشغيلها بجهاز قياس للمسح «تناسبي غازي». وتعتبر «المسحة» أفضل وسيلة تقنية للكشف عن التلوث السطحي للتريتيوم بالمستوى المنخفض. ولقد استخدم عدّ الغاز التناسبي والوميضي السائلي لقياس النشاط على المسحات. وبالنسبة لمعظم التطبيقات وجد[١٧] أن مرشحات الفاينيل هي أعظم المواد كفاءة في استخدامها كمسحات. على أن مرشحات الورق تقلل معدل العدّ في العد الوميضي السائلي بمقدار ١٥٪ أو أكثر وذلك بسبب عدم شفافيتها لطول موجة الضوء المنبعث بواسطة الوامضي. ومع ذلك فان مرشحات الورق لها ميزة التكلفة المنخفضة ووفرتها في معظم المختبرات.

(٣) الاستنباء الشخصي:

ان كلا من تحليل البول وتحليل التنفس الذي يُزفر يستخدم لعمل تقدير لأحمال الجسم من التريتيوم والتعريضات للاشعاع الداخلي. ويعتبر العد الوميضي السائلي لعينات البول هو الطريقة المختارة لتحليل المستوى المنخفض.

ويضاف عادة ملي متر واحد من البول الى ١٥ ملي متر من خليط الوميض ويُعَد[١٨]. ويمكن تعيين كفاءة العدّ باضافة كمية معروفة من التريتيوم الى العينة ويعاد العد (أو استخدام عيار خارجي لو كان متاحاً). ويمكن الحصول على كفاءة ١٠٪ تقريباً بعينة خام من البول. على أن نزع لون البول بالفحم

الحطب وترشيح أو تقطير البول سيعمل على زيادة الكفاءة[٤]. وسوف تبين مقارنة تركيز التريتيوم في عينات البول المأخوذة قبل وبعد التعرض كمية التريتيوم المأخوذة.

ونظراً لأن التريتيوم سينتشر داخل غطاء ربطة فيلم الاستنباء الشخصي، فان مثل هذه الخاصية قد استخدمت لتطوير نوط الفيلم (film badge) للاستعمال في توثيق التعرض الشخصي لمستويات التريتيوم العالية[١٩].

٣ ج تحجيب معجلات الطاقة العالية

لقد تزايد حجم وتكاليف الماكينات والمباني مع التطوير المستمر للمعجلات الى طاقات أعلى وكثافات أشد. وعندما يُصمَّم معجل جديد تظهر الحاجة الى معلومات كاملة عن خواص الاشعاعات وعن معاملات الاضمحلال لمواد. التحجيب بحيث يضم نظام التحجيب في تصميات المبنى. ولهذا الغرض ينبغي على المصمم أن يتوقع سلفاً الطاقة القصوى الممكنة وشدة حزمة الأيونات النهائية لو أمكن ذلك. وفي نفس الوقت يجب أن يسمح النظام بمرونة كافية ليزود للتعديلات المستقبلة لتجارب البحوث. وفي المعجلات الأكبر تكون التحجيبات أضخم ومكلفة؛ ويصير التصميم الكفي ضرورة اقتصادية..

وكما هو الحال في معجلات الطاقة المنخفضة، يكون التحجيب مطلوباً لوقاية جميع الأفراد من تعرض الاشعاع المتزايد، فضلا عن تقليل كثافات الخلفية (الاشعاعية) من أجل الدراسات التجريبية. عل أن متطلبات تحجيب الأجهزة تفوق في المعتاد تلك المتطلبات لوقاية الأشخاص. فعلى سبيل المثال تستعمل غالباً قناة ضيقة جداً خلال جدار تحجيب سميك للحصول على حزمة مجمعة من الاشعاع المختار، ومن الممكن الاحتياج الى تطويقات من الرصاص أو الخرسانة حول الكاشفات لتقليل الخلفية الاشعاعية المشتتة، ويمكن بهذا توجيه الحزمة المنقولة الى « مصايد » اشعاعية فيما بعد الجهاز التجريبي وذلك لتقليل

التشتت الخلفي. وقد يكون التحجيب في مثل هذا النظام أضخم واثقل جزء في التركيب التجريبي.

العوامل التي تُعتبر في تحجيب معجل::

ان الاشعاعات التي تعتبر ذات أهمية في تحجيب المعجلات هي تلك التي لها مقاطع تفاعل صغيرة مع المواد الشائعة المستخدمة في التحجيبات، وتكون لذلك ذات خاصية اختراقية. وهي قاصرة كذلك على تلك التي تنتج بكثافة هامة. وفي حالة الاشعاعات ذات المدى الأقصر أو الكثافة المنخفضة التي قد تكون مشوقة للباحث النووي لا تعطي أهمية لذلك. وفي كل وضع للتحجيب سيكون في العادة لكل مركبة اشعاع الاختراق الأقصى وسيتحدد تركيب الدرع وسمكه. وكما رأينا في معجلات الطاقة المنخفضة، تكون هذه المركبة المهيمنة هي اشعاع ثانوي أُنتج في مادة التحجيب. وعادة ما سيكون هذا السمك للتحجيب أكثر من كافي لمركبات اشعاعية أخرى. وتبعاً لذلك تكون المشكلة أن نعرف المركبة المهيمنة وأن نعين كثافتها.

ومشكلة أخرى نموذجية هي تنمية خلائط اشعاعية ناتجة عن عمليات ثنائية وثلاثية داخل المواد الماصة. وسنقدم فيما يلي مسحاً مختصراً لمثل هذا الاشعاع والتفاعلات الاشعاعية، ونعامل بصفة رئيسية جسيمات الطاقة العالية. ولمزيد من التفاصيل عن معالجة هذا الموضوع يمكن الرجوع الى المراجع المناسبة، وعلى الأخص يعطي المرجع (٢٠) تحليلاً شاملاً لتحجيب المعجلات.

أ ـ اضمحلال الأشعة السينية:

ان اضمحلال الأشعة السينية الوحيدة تُحسب (أو تقاس) بالتنظيم المثالي لحزمة مجمعة وضيقة من مثل هذه الأشعة التي تعبر شرائح رفيعة من المادة الماصة المكونة من عنصر منفرد. وفي هذه الحالة ينطبق قانون الامتصاص الأُسّي المشهور:

$$كث = كث_{صفر} \cdot e^{-\mu س} \qquad (٢)$$

حيث = $كث_{صفر}$ = الكثافة الابتدائية ، كث = الكثافة النهائية بعد اختراق مادة ماصة سمكها س ، ولها « معامل امتصاص خطي » μ . ويمكن الحصول على μ بدلالة طاقة الأشعة السينية الوحيدة الطاقة حتى ١٠٠ م إف لمواد مختلفة[٢١] .

ان معكوس معامل الامتصاص الخطي ، $\frac{1}{\mu}$ ، هو سمك المادة الماصة الذي يقلل الكثافة الى $\frac{1}{e}$ ، أو يقللها الى ما قيمته ٣٦٦ر٠ $كث_{صفر}$ ، وتسمى هذه المسافة « طول ثني - e » (e-folding length) . والوحدة الأوسع انتشاراً في استعمالها هي « سمك نصف القيمة » (half-value thickness) وهي سمك المادة الماصة التي تقلل الكثافة الى ٥ر٠ $كث_{صفر}$ ، وتُعطي بالقيمة :

$$س_{\frac{١}{٢}} = \frac{لو_{e}^{٢}}{\mu} = \frac{٠ر٦٩٣}{\mu} \qquad (٣)$$

ولا تزال هناك وحدة أخرى « طول ثني - ١٠ » (the 10-folding length) هي تلك التي تنقص الكثافة الى ١ر٠ $كث_{صفر}$ ، وتُعطى بالقيمة :

$$س_{٠ر١} = \frac{لو_{e}^{١٠}}{\mu} = \frac{٢ر٣٠٦}{\mu} \qquad (٤)$$

وعند استعماله لحسابات التحجيب ، يكون الاضمحلال لسمك مادة ماصة س معطى بـ

$$\frac{كث}{كث_{صفر}} = ١٠^{-\frac{س}{س_{٠ر١}}} ، \quad \frac{كث}{كث_{صفر}} = ٢^{-\frac{س}{س_{٠ر٥}}} \qquad (٥)$$

ويكون لمعامل الامتصاص الكتلي $\mu_{ك} = \frac{\mu}{\rho}$ وحدات سم^{٢}/(جم ρ هي كثافة المادة بوحدات جم/ سم^{٣}) - وهكذا تصير معادلة الاضمحلال :

$$\frac{\text{كث}}{\text{كث}_{\text{صفر}}} = e^{-\mu_{\text{ك}}(\rho\ \text{س})}$$

حيث س هي الكتلة لوحدة مساحة التحجيب (في وحدات جم/ سم^2). وعادة ما تُعطى قيم $\mu_{\text{ك}}$ للأشعة السينية الوحيدة الطاقة ولأشعة جاما في المواد الشائعة الانتشار وللطاقات المختلفة.

واذا اعتبرنا امتصاص أشعة جاما فعلى المرء أن يتذكر أن الأشعة السينية وأشعة جاما هي في الحقيقة متكافئة اذا ما كان الأمر يتعلق بخواصها المرئية. فكلا الاسمين يصف اشعاعاً كهرمغناطيسياً عالي الطاقة نسبيا. فبينما تتكون حزم الأشعة السينية من فوتونات تتولد بواسطة الكترونات يُعمَل على تبطيئها تنشأ أشعة جاما في التفاعلات النووية. ويستخدم المصطلحان فقط للتمييز بين التفاعلات التي بواسطتها تنشأ الفوتونات. ونتيجة لذلك فان امتصاص أشعة جاما سيتأتى من نفس العمليات كما في الأشعة السينية

ب ـ الوابل الالكتروني: («الادشاش» الإلكترونية Electronic Showers)

ان الالكترونات العالية الطاقة تفقد معظم طاقتها في انتاج وابل متعاقب من الأشعة السينية، والالكترونات الثانوية والبوزيترونات. ويسمى هذا في المصطلحات الفنية للأشعة الكونية «الوابل الضعيف النفاذية» (soft shower) ويبدأ بالكترون عالي الطاقة الذي يفقد طاقة بالاشعاع. وللالكترونات الساقطة ذات الطاقة العالية (> ١ ب إف) ينمو الوابل الى ما يشبه شكل العمود، له قالب مركزي ذو اشعاعات عالية الطاقة يحيط بها غلاف من الكترونات ثانوية منخفضة الطاقة.

كذلك تنتج الأشعة السينية عالية الطاقة نيوترونات ضوئية (photoneutrons) من خلال عمليات الانحلال الضوئي. ومع أن النيوترونات تحمل جزءاً صغيراً فقط من الطاقة الكلية للوابل فهي تثبت أنها المركبة

المهيمنة بعد الاضمحلال الكبير خلال مواد الامتصاص السميكة، وذلك بسبب اختراقها الأعظم بكثير.

. ويجدر بالذكر أن الخواص الأساسية للوابل المتعاقب توصف جيداً بنظرية «وابل الأشعة الكونية»[٢١]. ويذكر أن المقاطع والتوزيعات الزاوية للتفاعلات الكهرمغناطيسية العديدة معروفة، متضمنة التغييرات مع الطاقة .وتتنبأ التغيرات الاحصائية بنمو وانتشار الأشعة الثانوية والاضمحلال الناتج عن العمليات الامتصاصية. وقد أعطت هذه الدراسات تنبؤات عن عدد الأشعة الثانوية في الوابل لكل الكترون ساقط، عند الطاقات الساقطة المختلفة وبدلالة المادة الماصة والسمك. ومع أنه من الممكن حساب منحنيات الاضمحلال للالكترونات وحيدة الطاقة من نظرية الوابل، الا أنه من المفيد أكثر أن نراقب تأثيرات إلكترونات المعجل مباشرة. والمثل على الدلالة التجريبية لاضمحلال الوابل الالكتروني يأتي من معجل «ستانفورد» الخطي[٢٣]، حيث أجريت دراسات عن مركبة اضمحلال الوابل الالكتروني من الكترونات ١٣٥ م إف ساقطة، وذلك في عملية تعيين كفاءات وأبعاد عدادات سيرينكوف ووميضية مستخدمة لجسيمات عالية الطاقة.

د ـ النيوترونات الضوئية (Photoneutrons)

ان مركبة الأشعة السينية العالية الطاقة للوابل الالكتروني تنتج نيوترونات بتفاعل الانحلال الضوئي النووي (ة ،ن) في كل العناصر بصفة أساسية، وهي عملية لها طاقة حد مميزة لكل عنصر. ويرتفع «المقطع» مع زيادة الطاقة فوق حدٍّ الى قيمة قصوى تعرف «بالرنين العملاق» (giant resonance)، عند طاقة ١٥ الى ٢٠ م إف في معظم العناصر. ويمثل هذا الرنين منطقة ذات كثافة عالية بشكل غير عادي لحالات الاثارة في النواة الهدف. وفي عملية الانحلال الضوئي تنبعث النيوترونات بطاقات في المدى ٨

الى ١٢ م إف ، تاركة النواة الناتجة في حالتها« الأرضية » أو في حالة اثارة منخفضة الطاقة.

كذلك تحرر الأشعة السينية ذات الطاقات التي تعلو « الرنين العملاق » نيوترونات خلال تفاعل الانحلال الضوئي ، ولكن بمقاطع أصغر ، ومع ذلك فان النيوترونات لها طاقات أعلى تناسبياً ، كما أنها أكثر اختراقاً . وقد اتضح أن[٢٠] اختراق النيوترونات يزيد بحدة في مدى الطاقة ١٠٠ الى ٣٠٠ م إف. ونتيجة لذلك ، تصير هذه النيوترونات العالية الطاقة المركبة المهيمنة لمعجلات الالكترونات عالية الطاقة.

ويؤخذ في الاعتبار عادة صنفان من النيوترونات الضوئية عند تحليلها :

(١) نيوترونات بطاقة أقل من ٦٠ الى ٨٠ م إف والتي تنتج عند أو قرب « الرنين العملاق » ، والتي لا يختلف الاضمحلال بشدة بالنسبة لها في المواد الماصة عن نيوترونات السيكلوترون أو الانشطار.

(٢) نيوترونات بطاقة أعلى من ٨٠ م إف منتجة بواسطة التأثير الضوئي المباشر في كل النويات بصفة أساسية عند الطاقات العالية ، والتي يكون الاضمحلال لها أقل كثيراً منه لنيوترونات « الرنين العملاق ».

ويمكن اثبات[٢٤] أن نتاج النيوترونات الضوئية لكل الكترون ساقط ذي طاقة طا$_{صفر}$ يُعطى بواسطة

نتا (ن) = $\frac{ف}{و}$ س$_{صفر}$ × ١٠$^{-٢٤}$ $\sigma$$_{نق}$ (طا) ط (طا$_{صفر}$ ، طا) د طا

نيوترونات/الكترون (٧) حيث $\sigma$$_{نق}$ (طا) هي المقطع الذري الكلي لانتاج نيوترون ضوئي بواسطة فوتون منفرد وبطاقة طا ، ف عدد أفوجادرو ، س$_{صفر}$ = الطول الاشعاعي بوحدات جم/سم^{٢} ، والوزن الذري للهدف.

وكتوضيح لذلك أخذ ليفينجستون[٢٥] حالة الكترون ساقط ذي طاقة طا$_{صفر}$ = ١ ب إف ، وأجرى حسابات النتاج لثلاث ماصات نموذجية تحت عنوان « نيوترونات الرنين العملاق » : نتاج نتا (ن)$_{نق}$ عند ١ ب إف للخرسانة = ١٨ر٠ نيوترون/الكترون ، وللحديد ٢٧ر٠ ن/إ ، وللرصاص ٢٣ر٠ ن/إ ، ولما كان النتاج متشابهاً على وجه التقريب للمواد المختلفة ، فقد أُقترِحت قيمة واحدة[٢٥] لكل المواد من خلال حدود الدقة المطبقة لهذه الحسابات ، ولمشكلات التحجيب بصفة عامة :

نتا (ن)$_{نق}$ = ٢٥ر٠ طا$_{صفر}$ نيوترونات/الكترون

حيث طا$_{صفر}$ تكون بوحدات ١ ب إف

على أن هذا التعبير سيعطي خطأ كبيراً عند الطاقات المنخفضة نظراً للتقييم الزائد للنتاج في العناصر الخفيفة.

ويذكر أن التوزيع الزاويّ لهذه « النيوترونات الضوئية » المنخفضة الطاقة نسبياً يكون متجانساً بصفة أساسية . فهي تنتشر في كل الاتجاهات ابتداء من خط مصدري على طول قالب الوابل ذي الشكل العمودي للالكترونات الضوئية داخل المادة الماصة.

وبالنسبة لطاقات أعلى من ٨٠ م إف تنشأ النيوترونات العالية الطاقة من التأثير الضوئي المباشر . وقد أعطى حساب عطاءات نيوترونات الانحلال الضوئي[٢٥] نتا (ن)$_{نق}$ = ٥٨ر٠ ن/إ للخرسانة ، ٣ر٠ ن/إ للحديد و٠٩ر٠ ن/إ للرصاص . وهذه النيوترونات العالية الطاقة أكثر اختراقاً ، وهي تعين متطلبات التحجيب في الاتجاه الأمامي . وتُحتوى النيوترونات العالية الطاقة في مخروط أمامي له نصف زاوية تقدر بحوالي ٣٠°. وهذا يتطلب التحجيب الأكثر سمكاً وكثافة في الربع الأمامي . (راجع متطلبات التحجيب لمثل عملي لمعجل ١ ب إف حيث كثافة حزمته تكون ١ ميكروأمبير بالمرجع رقم ٢٥ ، صفحة ٥٦٢).

د ـ تأثير وابلات (أدشاش) النيوكليونات في المعجلات المتعددة الـ ب إف :

تنتج النيوكليونات (البروتونات أو النيوترونات) ذات الطاقة العالية نوعاً آخر من الوابل يتكون بصفة اولية من نواتج نيوكليونية ذات تفاعل عالي الطاقة. ففي تفاعل نموذجي لتصادم بروتون متعدد الـ ب إف ، على سبيل المثال ، تنتج نواة « متوسطة أو ثقيلة » نجماً نووياً (nuclear star) بداخله عدد من شظايا الجسيمات الثقيلة كالبروتونات والنيوترونات وميزونات باي (البايونات) التي تشاطر طاقة وكمية الحركة للنيوكليون الساقط. كذلك يمكن أن تترك نويات متخلفة في حالة من طاقة الاثارة العالية ، وهي الحالة التي « يتبخر » فيها مزيد من البروتونات والنيوترونات على شكل نيوكليونات منخفضة الطاقة. ان مثل هذه النواتج من الجسيمات المشحونة يتم الكشف عنها بالتصوير الفوتوغرافي للطبقات الحساسة (photographic emulsions) أو أنها تلاحظ في صور فوتوغرافية بالغرفة السحابية التي تميز بين بروتونات الطاقة المنخفضة ، البروتونات العالية السرعة أو الميزونات ، وبعض مسارات « التأين الدنيا » أو « الرقيقة » والتي تعتبر مميزة للبيونات العالية الطاقة للغاية أو ميزونات ميو. على أن النيوترونات والبيونات المتعادلة ليس لها آثار مرئية ، غير أنه يمكن تقدير عددها من اعتبارات إحصائية ، فهي مساوية تقريباً لعدد النواتج المشحونة.

وقد فحصت التفاعلات من نوع « النجمة » تجريبياً على معجلات البروتونات في مدى طاقة الـ ب إف ، ودُرِس « متوسط النجمة » الناتج في الخرسانة على ماكينة ٦ ـ ب إف[٢٦] وميزت مركباتها. وأُحدِث اضمحلال للجسيمات المنتجة في المادة الماصة خلال تشكيلة من التفاعلات النووية.

هـ ـ إضعاف جسيمات الطاقة العالية :

لنعتبر أولاً النيوترونات ، ولقد عالجنا في السابق حالة طاقات النيوترون

حتى ١٤ م إف . على أنه بالنسبة لطاقات أعلى حتى ٦٠ م إف ، يحدث نفس النوع من تفاعلات فقد الطاقة عند الطاقات الأقل انخفاضاً ، ويعتقد أن معامل الامتصاص لا يزيد بشدة . وفوق هذه الطاقات يصير نوع التعاقب النيوكليوني أو الوابل ممكناً طاقياً. وتنتج النيوترونات « النجوم » التي تحرر نيوترونات أخرى ، عميقاً في التحجيب وموجهة بصفة أولية الى الأمام مع أنها أقل طاقة . وما دامت طاقة النيوترونات تزيد عن تلك التي تعتبر ضرورية لتكوين « النجم » ، فان النيوترونات تميل الى اعادة انتاج نفسها . وهذه المضاعفة للنيوترونات عميقاً في التحجيب تبسط المدى الفعال للنيوترونات قبل أن تمتص ، وتؤدي الى تقليل هام في معامل الامتصاص الملاحظ للنيوترونات عالية الطاقة بكفاية .

ويلاحظ أن اضعاف النيوترونات ذات طاقة ١٠٠ م إف أو أكثر لم يكن بعد واضحاً بما فيه الكفاية ، ويعرف القليل من المعلومات عن عملية التعاقب النيوكليوني . وقد أعطت قياسات « سمك نصف القيمة » التي أجريت على السينكروسيكلوترون ـ ١٨٤ بوصة بجامعة كاليفورنيا(٢٦) ١٠ بوصات من الخرسانة عند ١٠٠ م إف و١٨ بوصة من الخرسانة عند ٣٠٠ م إف . وترجع الزيادة السريعة في « سمك نصف القيمة » للطاقات بين ١٠٠ و٣٠٠ م إف الى نمو التعاقب النيوكليوني . وفي هذا المدى للطاقة يكون التفاعل الابتدائي الأعظم أهمية هو تشتت « النيوكليون ـ النيوكليون » الذي يتغير له المقطع لكل نيوكليون مع الطاقة ، ولكنه يعتمد فقط بطريقة ثانوية على العدد الذري للمادة الماصة . ويكون معامل الامتصاص متناسباً طردياً مع كثافة المادة ، كما أن « أنصاف قيمة » السمك تكون مناسبة عكسياً مع الكثافة .

وكلما تعلق الأمر ببروتونات الطاقة العالية فقد أجريت قياسات(٢٦) لاضمحلال الوابل النيوكليوني الذي بدىء بواسطة حزمة بروتونات ٣ ـ ب إف خارجية في خرسانة مسلحة بالحديد بكثافة ٣ر٤ جم/سم٣ . وفي مثل هذه

القياسات عين كل من عدد الجسيمات المخترقة وشدة التأين عند فواصل ١٢ بوصة بين كتل الخرسانة وخارجاً حتى سمك كلي قدره ٥ر١٣ قدم. وقد وجد أن الحزمة تنتشر عرضياً في المنتصف داخل الركام الى اتساع نصف الكثافة بحوالي ٢ قدم. وقد كانت آثار النمو لا تزال ملحوظة حتى ٤ قدم. ولثخانات أكبر كانت كلا كثافة الجسيمات المخترقة وشدة التأين تتبع اضمحلالا أسياً بسيطاً وذلك بنفس « سمك نصف القيمة » تقريباً وقدره ٥ر٨ بوصة. وعلى افتراض أن معاملات الامتصاص متناسبة مع الكثافة، فهذا يناظر سمك « نصف القيمة » في خرسانة عادية قدرها ٦ر١٥ بوصة. ويكون فقد طاقة تأين البروتونات الاولية في الخرسانة المسلحة حوالي ٢٠٠ م إف/قدم، لذلك فان طاقة البروتونات تقل الى قليل من مئات الـ م إف في اختراقها تحجيب ٥ر١٣ قدم.

ولاضمحلال الميزونات، دعنا أولا نعتبر الميكانيكية التي تنتج بها ميزونات باي (المعروفة بالبيونات). وأبسطها هو الانتاج الضوئي خلال التفاعلات.

$$\gamma + \text{بروتون} \rightarrow \text{ن} + \pi^{+} \text{ ، } \gamma + \text{ن} \rightarrow \text{بروتون} + \pi^{-} \text{ ،}$$
$$\gamma + \text{بروتون} \rightarrow \text{بروتون} + \pi^{\circ} \qquad (٨)$$

وستكون كل من هذه التفاعلات ممكنة طاقياً وذلك لطاقة حدّية معطاة لشعاع جاما، والتي يمكن حسابها من كتل البيونات والحركية المجردة (Kinematics) للتصادم. **ويمكن أن تؤخذ طاقات شعاع جاما الحدّية للانتاج الضوئي على أنها ليست أكبر كثيراً من قيم كتلة البيون.**

ويلاحظ أن انتاج البيونات ضوئياً بأشعة جاما مماثل للإنتاج الضوئي للنيوترونات فيما عدا أن قيم الانتاج الحدّية وطاقات الرنين تكون أكبر.

هذا ويمكن تعيين نتاج بيونات الرنين من المعادلة ٧ لطاقة إلكترون ساقط قيمتها $\text{طا}_{\text{صفر}}$ = ١ ب إف، مستخدمين الثوابت الصحيحة لمواد التحجيب المختلفة. ويعطي هذا :

نتا $(\pi)_{نق}$ = ١٠^-٣ بيون/الكترون للأرض أو الخرسانة

نتا $(\pi)_{نق}$ = ٢ × ١٠^-٣ بيون/الكترون للحديد

نتا $(\pi)_{نق}$ = ٤ × ١٠^-٣ بيون/الكترون للرصاص

وتظهر المقارنة بنتاجات النيوترونات الضوئية أن نتاجات ميزونات الرنين الضوئية تكون حوالي ١٪ من كثافات نيوترونات الرنين الضوئية.

والواقع أن انتاج الميزونات بواسطة تفاعلات النيوكليونات يصير هاماً للطاقات فوق ٢٠٠ الى ٣٠٠ م إف. وتنتج العمليات الأولية الآتية بيونات مفردة:

ب + ب ← ن + ب + π^+ ، ب + ب ← ب + ب + π^0 ، كذلك

(٩)

ن + ب ← ن + ن + π^+ ،

ن + ب ← ب + ب + π^- ، ن + ب ← ن + ب + π^0

ان الطاقة الحدية energy threshold للنيوكليون الساقط ٢٩١ م إف وذلك لانتاج بيونات مشحونة، و٢٨١ م إف للبيونات المتعادلة[٢٠].

ويرجع اضمحلال الميزونات المشحونة الى فقد الطاقة بالتأين، ويزداد معدل الفقد كلما تناقصت السرعة. وعندما تكون قد بُطِّئت البيونات السالبة بواسطة التأين أو التصادمات، فانها تؤسر بواسطة النوى، محرِّرةً بذلك طاقتها الكتلية على شكل أشعة جاما، أو محدثة انحلالاً للنيوكليونات مع انبعاث نيوترونات. وبينما يُحرَّر نيوترون طاقته حوالي ٧ م إف في حوالي $\frac{١}{٣}$ تفاعلات البيون السالب، لا تستطيع البيونات الموجبة البطيئة دخول النوى، وهي تتحلل في العادة الى ميونات ونيوترونات بعمر نصفي مميِّز قدره ٢٫٥٤ × ١٠^-٨ ثانية. على أن الميون الموجب ذاته يتحلل الى بوزيترون ونيوترينو (عمر نصفي ٢٫١٥ × ١٠^-٦ ثانية)، ويفقد البوزيترون الطاقة

بالتأين والاشعاع والتلاشي. والبيونات المتعادلة (π°) ليس لها تفاعلات أساسية مع النوى وتتحلل فورياً (١٠-١٦ ثانية) الى شعاعي جاما بطاقة ٦٨ م إف لكل منهما. ومن ناحية أخرى تضمحل أشعة جاما بالانتاج الزوجي وبتفاعلات كهرمغناطيسية أخرى. ويكون لبيونات الطاقة العالية المشحونة نفس نوع التفاعلات النووية كالبروتونات ذات الطاقات المتكافئة، ويكون المقطع هو نفسه بصفة أساسية. ولاعتبارات التحجيب تكون نيوترونات الطاقة العالية أعظم نواتج التفاعل أهمية. وكما شُرح في السابق، تنمي البروتونات الواقعة في مدى طاقة الـ ب إف الوابلات النيوكليونية التي يتعين الاضمحلال لها بواسطة مركبة النيوترون السريع وعلاوة على ذلك، تنتج كذلك البيونات بهذه الطاقات عمليات من نوع «النجمة».

ومشكلة أخرى في التحجيب هي تكوين ميزونات ميو (الميونات) بانحلال الميزونات ذات الطاقة العالية.

وتستطيع الميونات أن تخترق الدروع تحت أحوال معينة حتى عندما تكون مثل هذه الدروع كافية لاضعاف المركبات النيوكلونية. وذلك لأن الميونات لها مقطع للتفاعلات النووية صغير بحيث يمكن اهماله؛ ويكون التأين لذلك هو العملية الوحيدة التي يمكن بواسطتها أن تفقد الميونات طاقة. وفي معظم الانشاءات فان التحجيب الذي صمم لاضعاف الوابل النيوكليوني يكون سميكاً بما يكفي لأن يمتص كل طاقة الميونات. ومع ذلك، ففي حالة المعجلات المتعددة الـ ب إف ذات الكثافة المنخفضة للحزمة فانه من الممكن ألا يكون التحجيب المطلوب لانقاص كثافة الوابل المنطلق الى ما بعد التفاوت المسموح كافياً لأن يمتص كل طاقة الميونات.

ان الوسيلة الفنية المستخدمة لازالة خلفية الميونات تكون باستعمال تحجيب من مادة بكثافة عالية بالقرب من الهدف حيث تكون البيونات. ويذكر أن تحجيباً حديدياً لحزمة من ١٠١٠ بيون/ثانية بطاقة ٥ ب إف يكون

حوالي ١٠ أضعاف متوسط المسار الحر (mean free paths) أو ٧٫٥ قدم طولا .

تأثير القنوات والانفاق خلال الدروع :

يكون من الضروري أحياناً في معظم المعجلات أن نحضر أحزمة من الجسيمات منطلقة أو اشعاعاً داخل حائط التحجيب من أجل اجراء تجارب تحت أحوال كثافة خلفية منخفضة فيما بعد الحائط . وتعطي الكثافة المنطلقة (كث) للنيوترونات السريعة أو لأشعة جاما المنقولة في نفق اسطواني مستقيم بنصف قطر نق وطول ل (= سمك حائط التحجيب بالقيمة[٢٠]

$$\text{كث} = \text{كث}_{\text{صفر}} \left[١ - \left[١ + \left(\frac{\text{نق}}{\text{ل}}\right)^{٢} \right]^{-\frac{١}{٢}} \right] \qquad (١٠)$$

حيث كث $_{\text{صفر}}$ = الكثافة داخل التحجيب والتي يفترض أن تكون متساوية الخصائص في جميع الاتجاهات ، ولا تعاني من الانعكاسات من الحائط الداخلي للنفق. ويرى أن الكثافة النسبية أعلى بكثير عند نسب صغيرة للنفق .

وفي مختبرات عديدة للمعجلات والتي يستعمل فيها قنوات خلال الدروع الأولية لتُحضِر الحزم المنطلقة الى الخارج كانت كثافة الاشعاع في المنطقة التجريبية خارج التحجيب متزايدة بسبب الاشعاع المتسرب خلال القنوات او الشقوق في التحجيب مضافاً الى الاشعاع الناتج بواسطة الحزمة المنطلقة[٢٠] . وفي هذه الحالات كانت المنطقة التجريبية قد زودت كذلك بالتحجيب ، وكان قد تم تشغيل التجارب بالتحكم عن بعد .

الأخطار الاشعاعية بالفاعلية الإشعاعية المستحثّة واشعاع «تألق السماء» : (Skyshine)

لقد ذكرنا بعض الآثار والاحتياطات للتعرض الاشعاعي للأشخاص في

مناولة الأهداف وفي عمليات صيانة أجزاء المعجل. وفي هذا الشأن تكون الفاعلية الاشعاعية المستحثة واحدة من الأخطار الرئيسية، وتكون الوسائل الفنية للاستعمال عن بعد وكذلك الأنظمة السريعة العمل مطلوبة لتغيير الهدف وللمعالجة الكيميائية للأهداف والعمليات الروتينية الأخرى. ويلاحظ أن مدى الطاقات في أطياف أشعة جاما وبيتا المركبة يكون مماثلاً لطيف الانتاج الانشطاري، متضمناً في الحقيقة كثيراً من نفس النظائر. هذا وتعتبر معاملات الامتصاص في الرصاص والتحجيبات الأخرى أساسيّاً هي ذاتها كأولئك بالنسبة للفاعلية الاشعاعية لنتاج الانشطار. وعادة ما يستفاد من الخبرة والمواصفات المتاحة من شتى الدراسات ومن تقارير ترتبط بتقنية المفاعلات والكيمياء الاشعاعية في متطلبات التحجيب وفي الوسائل الفنية للاستعمال(٢٧).

هذا وتغطي الفاعليات الاشعاعية المنتجة بالمعجلات مدى واسعاً للشدة الاشعاعية والعمر النصفي، الناتجة من كثير من النظائر المشعة. ويذكر أن المواد المتباينة في المعجل وحوله والتي يمكن أن تصدم بالأيونات الموجبة والنيوترونات وأشعة جاما تؤدي الى اتساع في الأعمار النصفية من الضخامة بقدر ما في طيف ناتج الانشطار تقريباً من مفاعل انشطاري. وحتى منحنى الانحلال المركب يكون مماثلاً؛ ويظهر معدل الانحلال المقاس عند زمن (ز) بعد أن توقف الماكينة عمراً نصفياً قدره (ز) تقريباً، وبالنسبة لنواتج الانشطار يكون العمر النصفي الظاهري ٢ر١ ز.

ونوع آخر من الخطر الاشعاعي يعود الى الاشعاع الموجه الى أعلى ثم يشتت ثانية نحو سطح الأرض بالتصادمات مع نوى الهواء. ويعرف هذا «بتألق السماء» الذي يتعين تأثيره البيولوجي بصفة مهيمنة بواسطة مركبة النيوترونات المنخفضة الطاقة، ونظراً لأن مقطعها للتشتت المرن أو غير المرن يكون كبيراً بينما مقطع الامتصاص يكون أقل كثيراً، لذلك فمثل هذه النيوترونات تستطيع أن

تنتشر فوق مسافات كبيرة. والواقع أن التأثير البيولوجي الاشعاعي لنيوترونات الـ م إف تكون أكبر من أشعة جاما أو المركبات الكهربية. وقد وجد[٢٦] أن قيمة صدمة التشتت لكل نيوترون موجه لأعلى تكون ٢٧٠ متر لطاقة ٥ الى ١٠ م إف عند التفاعل مع نوى الأكسجين والنتروجين في الهواء. وتبعاً لذلك فان مصدر «تألق السماء» يكوّن قبة نصف كروية منتشرة في الهواء فوق المعجل بنصف قطر متوسط بهذه الدرجة من القدر. ويلاحظ أن اشعاع «تألق السماء» المشتت فوق الحواجز التي تحيط بمعظم المعجلات في الاتجاه الافقي تضيف الى الاشعاع المباشر الذي يُضمَحل بواسطة هذه الحواجز. وتُعيَّن الكثافة النسبية بالمسافة والتنظيم الهندسي للحواجز. ويمكن تقليل كثافة «تألق السماء» الى قيم مقبولة خارج المباني المحتوية على معجلات ذات حجم صغير مثل السيكلوترونات. أما المعجلات الأكبر ذات الطاقات الأعلى، مثل سينكروترونات البروتونات فانها تُحجّب عادة في أنفاق للتحكم في الكثافة الموجهة الى أعلى. على أن الماكينات العالية الطاقة تتطلب مختبرات كبيرة للغاية والتي تجري بداخلها تجارب على الحزم المنبثقة. وتكون تكلفة تزويد سقف تحجيب لمثل هذه المنطقة التجريبية الكبيرة عالية.

ان كثافة التدفق المشتت عند مسافة «نق» من «مصدر نقطة» ذي $ن_{صفر}$ نيوترون/ثانية تُعطى بواسطة[٢٠]

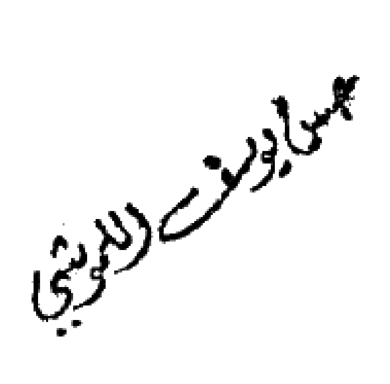
$$\phi_{مصدر} = \frac{ن_{صفر}}{4\pi\, نق^{2}} \left(1 - e^{-\frac{نق}{\lambda}}\right)$$

حيث λ متوسط مسار التشتت الحر.

ويكون للعناصر الأثقل في الأرض والمواد الصلبة الأخرى مقطع امتصاص أكبر للنيوترونات عنها للأكسجين أو النيتروجين. لذلك تصير الأرض «غورا» للنيوترونات في شكل مستوى أفقي محدد للقبة النصف كروية لتألق السماء.

ونظراً لأن الاهتمام يتعلق بصفة أولية بكثافات متاخمة لسطح الأرض فان تأثير هذا الامتصاص الأرضي يكون ملحوظاً.

وكمثل للتحجيب الأرضي فان المبنى الحلقي لسينكروترون ميل الصفر ذي ١٣ ـ ب إف (الباب الأول، صفحة ٨٨) يُغطّى بهضبة من الأرض بسمك أدنى ٢٠ قدم يمتد الى ١٠٠ قدم. ويظهر ذلك كهضبة من الأرض بقطر ٤٠٠ قدم عند القاعدة، و٥٠ قدم في الارتفاع وحوالي ٢٠٠ قدم في القطر عند القمة. ويوضع المعجل الخطي في مبنى حوالي ١٢٠ قدم طولا، مغطى كذلك بكومة من الأرض. ومن أجل التجارب بالميزونات يحتاج الباحثون لكميات هائلة من التحجيب في شكل كتل من الخرسانة. وفي حالة سينكروترون ميل الصفر ذي ١٣ ـ ب إف تُصمَّم الأرضية بحيث تتحمل حملاً قدره واحد طن للقدم المربع.



المراجع

١ - Code of US Federal Regulations, Title 10-Atomic Energy. Part 20 — Standards of Protection Against Radiation (January 1, 1967)

٢ - High Voltage Engineering Corporation, The Van de Graff Nuclear Physics Teaching Laboratory, High Voltage Engineering Corporation, Burlington, Mass

٣ - US National Committee on Radiation Protection and Measurements, Protection Against Neutron Radiation up to 30 Mev, US Government Printing Office, Washington 1957 (US National Bureau of Standards Handbook 63).

٤ - "Health Physics Aspects of Low-Energy Accelerators", JD Berger, et. al., Proceedings of the Conference on the Use of Small Accelerators for Teaching and Research, Oak Ridge, Tennessee, April 8 — 10, 1968, CONF — 680411

٥ - "Shielding Measurements for 3 Mev and 10 Mev Neutrons" JJ Broerse FJ Van Wervan, Health Physics 12, P 83-93, 1966

٦ - "Penetration Parameters for 15-Mev Neutron Beams" JJ Broerse Kerntechnik 9, P. 446 — 451, (Use was made of reference 4)

٧ - JT Prud'homme, Texas Nuclear Corporation Neutron Generators, Texas Nuclear Corporation, Austin, Texas, March 1962

٨ - "Dosimetry and Shielding in a 14-Mev Neutron Generator", USAEC Report ORNL - 1757

٩ - "Medical X-Ray Protection Up to 3-Mev", US National Committee on Radiation Protection and Measurements, US Government Printing Office, Washington (1961), US National Bureau of Standards Handbook 76)

١٠ - "Ativation Analysis: New Generators and Techniques Make it Routine" Nucleonics 20, No 3, 60-65, 1962

١١ - "The Possible Radiological Hazards from Tritium Sources Absorbed on Tritium", UKAEA Report AERE-M 1169, 1963

١٢ - "Operations Plan-Operation HENRE", edited by FF Haywood TG Provenzano, JA Auzier, USA EC Health and Safety Report CEX - 6503, 1965

١٣ - "Physiology and **Toxicology** of Tritium in Man", EA Pinson, and WH Langham, J App. Phys. 10, 108-126, 1957.

١٤ - "Studies and Techniques in Tritium Health Physics at CRNL, RV Osborne, Atomic Energy of Canada Limited Report AECL 2699, November 1967.

١٥ - "Radiological Health Problems Associated with the Operation of Neutron Generators", RF Boggs, R Jacobs, RL Lupold, Presented at the 11th Annual Health Physics Society Meeting, Houston, Texas, June 1966

١٦ - "The Tritium Incorporation Hazard Involved in the Operation of Neutron Generators", J. Biro, I. Feher, and T. Szarvas, Proceedings of the 2nd Symposium on Health Physics, Pecs, Hungary, September 1966, Vol. 1, Budapest, Central Research Institute for Physics, 1966, pp. 87 — 92

١٧ - "Measurements of Tritium Surface Contamination", S.W. Porter, Jr. and L.A. Slaback., Armed Forces Radiology Research Institute Report No. AD - 640 810, 1966

١٨ - "Assessment of Tritium in Production Workers. In Assessment of **Radioactivity** in Man", FE Butler Heidberg, May 1964, Vol. II, Vienna, International Atomic Energy Agency, 1964, pp. 431-442.

١٩ - "Tritium Film Badge", EL Geiger, Health Physics 14, pp. 51-55, 1968.
٢٠ - "Particle Accelerators", M.S. Livingston, J.P. Blewett Mc. Graw Hill Book Company, p. 495, 1962
٢١ - National Bureau Standards of the U.S., Handbook No. 55 (Feb. 26, 1954).
٢٢ - B. Rossi, and K. Greisen, Rev. Mod. Phys., 13, p. 240, 1941.
٢٣ - M. Chodorow, E.L. Ginzton, WW Hansen, R.L. Kylh, R.B. Neal, and W.K.H. Panofsky, Rev. of Sci. Instr., 26, pp. 134 — 204. 1955
٢٤ - "High Energy Particles", B. Rossi, Prentice-Hall 1952.
٢٥ - (Reference 20 above, p. 560).
٢٦ - "Conference on Shielding of High-Energy Accelerators" New York, Apr. 11 — 13, 1957, U.S. Atomic Energy Commission No. TID-7545, Dec. 6, 1957.
٢٧ - "Handbook on Radiation Hygiene", McGraw Hill Book Co., 1959.

الباب الرابع

الجوانب الاقتصادية والاستراتيجية
لمعجلات الجسيمات

٤ أ اقتصاديات المعجلات

مقدمة :

ان معجلات الجسيمات ، وعلى الأخص الضخمة منها المتعددة الـ ب إف ، تحتاج الى ميزانيات هائلة . فهي تتطلب انشاء مختبرات كبيرة وبالتالي دعماً مالياً كبيراً . وكم يبدو أن المعجلات علم ظاهري التناقض حيث دراسة أصغر الجسيمات في الطبيعة تتطلب بناء أضخم الأجهزة وأعقدها وأعظمها تكلفة . ومثل هذا التركيب المعقد وتكلفة المعدات والأجهزة المطلوبة لتجارب ذات معنى مع معجلات الطاقة العالية الحديثة قد زاد في السنوات الأخيرة بسرعة أكثر حتى مما هو مطلوب للمعجلات ذاتها . فتكلفة غرفة فقاعية كبيرة للايدروجين السائل وأجهزتها الملحقة بها تصل الى عدة ملايين من الدولارات ، والمغناطيسات المحلّلة المستخدمة لتحليل كمية حركة الاشعاعات الثانوية تكون في ضخامة مغناطيسات السيكلوترون ، وأنظمة انقاص وتحليل المعلومات تتطلب حاسبات آلية كاملة . أما تكلفة المباني والانفاق والأساسات لاحتواء وتحجيب معجل ضخم ، والمختبرات المتصلة به فقد صارت عاملاً مهيمناً في التكلفة الكلية ، تزيد في بعض الحالات عن تكلفة الماكينة ومصادر تغذية القدرة لها . وقد ارتفعت متطلبات القدرة الكهربية بمعدل أسرع من ارتفاع طاقة المعجل . وبالاضافة الى ذلك فان هناك حاجة الى عدد كبير من هيئة

العلميين والهندسيين والفنيين لاجراء البحوث وللقيام بأعمال التشغيل والصيانة.

لعل هذا هو السبب في أن أكثر من دولة تتعاون لبناء واحدة من تلك الماكينات العملاقة. ومثال على ذلك هو العملية المشتركة لسينكروترون ٣٠ - ب إف ذي الميل المتغير (إي جي إس) بسيرن في جنيف، المدعم بواسطة ١٣ دولة أوروبية. وعلاوة على ذلك تُوجَّه الجهود المستمرة نحو انبثاق أفكار ومبادىء جديدة لبناء معجلات باقتصاديات أفضل لنفس الطاقة، أو حتى لطاقة أعلى، ولكثافة أكبر لحزمة الأشعة المعجلة. بل أن الماكينات الضخمة انما تستعمل لخدمة أكثر من غرض من أجل تحقيق منافع اقتصادية. وفي هذا الشأن فان ما هو أعظم جدية لهو الاتجاه الجديد لاستخدام معجلات الطاقة العالية كمصادر طاقة، أو مولدات وقود نووي التي ستساعد على حل أزمة الطاقة اذا ما ثبتت الجدوى الاقتصادية للاستغلال التجاري. فان أراد المرء أن يعالج اقتصاديات معجلات الجسيمات فلا بد أن يأخذ في الاعتبار جانبين للمشكلة. أولاً، الاقتصاديات المتصلة بالمعجل ذاته وبتطويره فضلا عن المعدات الملحقة بالمعجل والتي تشترك - أو تساعد - في تشغيل المعجل. ثانياً، على المرء أن يعتبر اقتصاديات تطبيقات المعجلات عند استغلال حزمة أشعتها، أو عند استعماله كمصدر اشعاع؛ فالمنافع الاقتصادية الوثيقة الصلة بالموضوع تتطابق مع تلك التطبيقات التي عولجت في الباب الثاني.

٤ أ ١ اقتصاديات تطوير المعجلات

كما رأينا في الباب الأول كان الحد من زيادة الطاقة يعود في الأغلب الى قيود هندسية، أو في بعض الأحيان فيزيائية. وفي مثل هذه الحالة لو اريد رفع الطاقة فيما بعد الحدّ المقيّد فسوف تقلب التكاليف المتزايدة اقتصاديات مشروع المعجل. وكمثل على هذا في معجلات التيار المستمر مشكلة الارتفاع بالفلطية الى قيم أعلى من حدود معينة، في مولد الكوكروفت والتن التعاقبي - مثلا - أو

في مولد فان دي جراف الالكتروستاتي . ومن الناحية النظرية ليس لمثل هذه الزيادة في الفلطية العالية حدود ما دام حجم المعجل يُصعَّد جنباً الى جنب مع الحجم المتزايد لخزان التضاغط ، ومضخات تفريغ أكبر ، ومتطلبات للحيز أكثر ، الى آخره . وهكذا تقفز الزيادة الناتجة في التكلفة لوحدة الطاقة فوق الحدود المقبولة . والمثل الآخر هو تحديد الطاقة للسينكروسيكلوترون عند ٥٠٠ م إف ، والذي يصير حجم المغناطيس فوقه ضخماً بشكل لا يصدَّق وتبعاً لذلك تصير زيادة التكلفة غير محتملة ، متذكرين أن التكلفة تتناسب طردياً مع مكعب نصف القطر . وبدون اكتشاف مبدأ « ثبات الطور » الذي أدى الى ابتكار السينكروترون كان من الممكن في ذلك الوقت استحالة بناء معجلات في مدى طاقة الـ ب إف .

والمثل الآخر هو تطوير معجل بيليترون الإلكتروستاتي والذي تزيد فيه الطاقة لوحدة الطول ، فضلاً عن ازالة بعض الصعوبات الأساسية الشهيرة في المولدات **الالكتروستاتية**، كما شُرح في الباب الأول . فالبيليترون من النوع المطوى يعطي طاقات أعلى كثيراً لمتطلبات أقل بالنسبة لحيز المبنى .

أما سيكلوترون « القطب المنقسم » المتغير الطاقة فقد مكن من التعجيل المستمر لفصائل من الأيونات في مدى مئات الـ م إف ، بينما طاقة السيكلوترون العادي لم تزد عن قلة من عشرات الـ م إف .

وقد كانت حلقات التخزين تطويراً مهماً آخر جعل من الممكن تجميع كثافات للتيار ذات قيم غاية في الارتفاع ، فضلا عن تمكين العلماء من إجراء تجارب في الفيزياء النووية على جانب كبير من الأهمية .

وسيكون من المستحيل أن نعدد جميع هذه التطويرات التي تحسن ، أو في بعض الأحيان تحدث ثورة في ، اقتصاديات معجلات الجسيمات . ومع ذلك سيُعطى فيما يلي بعض الأمثلة الاضافية للتقدم الحديث الذي ساهم بشدة في اقتصاديات أجهزة المعجلات .

مفرطات الموصّلية في المعجلات:

لقد أحدثت مغناطيسات مفرطات الموصلية ثورة في تقنية تطوير المعجلات الحديثة. لقد نتج عنها تقليل ضخم في حجم المغناطيس، فضلا عن التقليل العظيم في استهلاك القدرة اذا قورن بالكهرمغناطيسات العادية. وفي المقابل فان تحسين الاقتصاديات واضح في الحالات الخاصة لحلقات التخزين، وفي السينكروترونات عندما تكون أنصاف القطر بقدر مئات الامتار. والتوضيح الممتاز لذلك يتمثل في مشروع مضاعف/ مقتصد الطاقة للمحطم الذري ٥٠٠ - م إف في فيرميلاب (الباب الأول). فليس فقط أن المجال المغناطيسي يزيد الى قيم أعلى كثيراً مما يؤدي الى طاقات تعجيل أعلى لأحجام أقل كثير، وانما كذلك تُخفض التكلفة السارية بدرجة كبيرة بسبب الاستهلاك المتناقص بشدة. والتطوير الأحدث في نفس المعجل هو نوع بدئي (prototype) لقطب ثنائي مفرط الموصلية[١] في مختبر التحويل بفيرميلاب والذي تم بناؤه واختباره. ان تصميمه الذي يستغل الحديد الدافىء، بقالب بارد، ٣ تيسلا عند ٢٨٥٠ أمبير، يمثل أسلوباً فريداً للتماسك الميكانيكي للملفات، مقدماً بذلك أملا لمغناطيسات مفرطة المُوصِّلية أفضل وأرخص.

كذلك فان «النقل المفرط الموصلية ذا المجال المرتفع» «High Field Superconducting Transport»[٢] في معمل بروك هافن انما ينطوي على بناء خط «دي» (D- line) في مختبر تحويل حزمة الأشعة الخارجية البطيئة بثني قدره ٢٠٫٤° في نهاية المجرى العلوي لخط الحزمة. وسوف يستخدم ثلاثة مغناطيسات ثنائية القطب من نوع «اطار الشباك» المفرط المُوصِّلية عند ٦٠ كيلوجاوس وذلك لتزويد الانحراف الضروري لحزمة البروتونات ٢٨٫٥ ب إف الخاصة بسينكروترون الميل المتغير. وسوف تمتص هذه المغناطيسات كميات كبيرة من التسخين الاشعاعي دون اخماد. على أن المزايا الرئيسية لنظام فرط الموصلية اذا قورن بمغناطيسات درجة حرارة الحجرة هي: التخفيض في

استهلاك القدرة مع تقليل ضخم في كل من مقطع وطول المغناطيسات.

وقد طورت في نفس المعمل[٣] وسائل فنية لبناء مغناطيسات لنقل حزمة كبيرة للغاية والتي يتم انشاؤها في نفس وقت اعداد هذا التقرير. ويُتوقّع الحصول على مجال للتشغيل قدره ٥ر٦ تسلا بحساسية ثبات مميزة جيدة، والتي تنتج من استخدام ألومنيوم عالي النقاوة حتى تنتشر الحرارة سريعاً داخل ملفات المغناطيس. وفي هذا المعمل[٣]، تقدر مزايا وعيوب تصميمات أجهزة التبريد الشديد المستقرة ذات الكثافة العالية للتيار والحماية الذاتية من وجهات نظر الأداء والاقتصاديات.

وهذه مجرد أمثلة للمنافع الاقتصادية التي تُكتسب باستخدام تقنية فرط الموصلية، وهناك مختبرات أخرى مهتمة بمشروع بنفس الأهمية لأغراض مختلفة. فحلقات التخزين، على سبيل المثال، قد أفادت من المزايا التي حققها فرط المُوصِّلية. وفي حلقات تخزين الالكترونات يساهم الطلب المتزايد لقدرة تردد الراديو جوهرياً في كل من الانشاء وتكاليف التشغيل. وفي معهد الفيزياء « بكارل سرو » تُظهِر التكلفة الفضلى[٤] أن حلقة تخزين بفجوات مفرطة الموصلية تكون أصغر وهي لذلك أقل تكلفة من نظيراتها العادية. وقد وجد بما يدعو للدهشة أن استبدال فجوات عادية في مفرطات الموصلية بحلقة تخزين متواجدة يزيد طاقة النهاية بحوالي ٤٠٪. وهناك تقارير عن قياسات مبدئية لفجوات حلقة تخزين من النيوبيام عند ٥٠٠ ميجاهيرتز. وعلاوة على ذلك، تمثل حلقة التخزين المعجلة المعروفة باسم ايزابيل (ISABELLE) في معمل بروك هافن القومي مركباً ضخماً للمغناطيسات المفرطة الموصلية، بأقطابها الثنائية الـ ٧٣٢ المفرطة الموصلية و٣٤٨ قطب رباعي[٥]. وفي اختبار هذا العدد الكبير من المغناطيسات تحت ظروف مماثلة لتلك المتوقعة في المعجلات سيطبق التبريد بواسطة مختبر مركزي متواجد في شكل غاز هيليوم عالي الضغط عند حوالي ٤° مطلقة. ومن ناحية أخرى، فان المرحلة رقم ٢ من نظام « بيب »

(مشروع البوزيترون ـ إلكترون PEP) لتردد الراديو في معمل لورانس بيركلي تتكون من اضافة حلقة تخزين بروتونات ذات مفرط للموصلية الى حلقة الالكترون ـ بوزيترون التي تستكمل الانشاء حالياً.

مبادىء جديدة للمعجلات:

تستمر الجهودات في تعزيز الأفكار الجديدة التي تقدم لتحقيق تعجيل الجسيمات باقتصاديات محسنة، إما على شكل تخفيض للطاقة المستهلكة، أو اقتصاد في الحيز. ويمكن أن تكون بساطة التصميم والتعقيد الأقل كثيراً في المعدات واحدة من الانجازات. وترمز الأمثلة التالية الى التعاون الممتاز بين مبادىء الفيزياء وتقنية الهندسة التي تقود الى انبثاق وسائل فنية للتعجيل تتميز باقتصاديات مفضلة[٦]. ولنبدأ بريسيكلوترون (recyclotron) ستانفورد المفرط الموصلية، فهذا معجل يعمل على الافادة من رحلات تعجيل متعددة لحزمة أشعته في نفس المعجل. وهكذا، يعد أول مسار تعجيل تستخرج الحزمة ليعاد ادخالها الى المعجل ولتؤدي رحلة تعجيل ثانية. ومن المتوقع بأربع مسارات لاعادة الدوران أن يعطي الريسيكلوترون حزمة ذات دورة أداء عالية (high duty cycle) (٧٠٪) عند ٣٠٠ مإف بحلول عام ١٩٨٢. وفي الوقت الحاضر أمكن اعادة دوران حزمة الأيونات مرتين كما انها استخرجت وكانت طاقة الحزمة ١٣٠ مإف، كما كانت درجة ثبات الطاقة (نصف قمة الموجة الكاملة (FWHM) ١٧ر٠٪. وكما جاء بالمرجع رقم (٦) سيستكمل تركيب أجزاء المسار الثالث والرابع هذا العام.

معجلات الحث: (Induction Accelerators)

لقد طورت معجلات الحث في بعض المختبرات، وأنشأ معمل لورانس ليفرمور معجل الكترونات نابض من نوع معجلات الحث[٧] الذي يعطي نبضات لحزمة الأشعة بطاقة ٥ مإف، وذروات عالية التيار تصل الى ١٠٠٠٠ر١٠ أمبير.

ويمكن أن ينتج المعجل طلقة من خمس نبضات ٥٠ نانو ثانية بتردد ١ ك . هيرتز كل ثانية عند متوسط قدره خمس نبضات في الثانية . وينجز التعجيل بواسطة فجوات محملة بمركب حديدي (ferrite) كل منها ذو مقدرة ٢٥٠ ك ف . وتتكون شبكة تكوين النبضة لفجوات التعجيل من « بلوملين » مملوء بالماء يدار بواسطة فجوة شرارة متحدة المحور ، تُفجَّر بالهواء ، وقادرة على توليد طلقات بمعدل واحد كيلوهيرتز . وقد وصف هيستر وآخرون معجلاً من نوع « الحث » وهو معجل الكترونات نابض ٢٫٥ م إف يولد نبضات تيار بقيمة للذروة ترتفع الى ١٠ كيلوأمبير اتساع نبضتها ٣٠ نانوثانية بمعدل تكرار ٥ نبضة في الثانية . وتتميز هذه المعجلات أنها تزود نبضات قوية للغاية (٥٠٫٠٠٠ ميجاوات في المعجل الأول و٢٥٫٠٠٠ ميجاوات في المعجل الثاني) وذلك من جهاز بسيط نسبياً .

معجلات الجسيمات المتجمعة (Collective-Particle Accelerators)

لقد طورت بعض المختبرات الأساليب الفنية لتعجيل الجسيمات المتجمعة . ففي مختبر البحوث البحرية بالولايات المتحدة الأمريكية أُقترِحت تقنية[٩] بسيطة ومبتكرة لمعجل الجسيمات المتجمعة ، فقد أُقترح أن حزمة الكترونية بسرعة نسبية وشديدة ، ومعدلة الكثافة ، تستطيع أن تسحب الجسيمات (الكترونات أو أيونات) وتعجلها الى طاقات عالية عندما تنتشر في مجال مغناطيسي معدل فضائياً . على أنه يوجد مجال كهربي قطري قوي في هذه الآلية وذلك من أجل تركيز الجسيمات . وقد لوحظ في نفس المعمل بروتونات معجلة تجميعيّاً عندما تُولّد حزمة الكترونات شديدة ونسبية ودوارة[١٠] ، وذلك بتمرير حزمة حلقية (annular beam) خلال نصف قُرنة ، وتنتشر أسفل أنبوبة موصلة مملوءة بغاز الأيدروجين المتعادل . هذا ، ولا يوضع مجال مغناطيسي خارجي على الأنبوبة . وقد لوحظ أكثر من ٨×١٠^{١٣} بروتون للنبضة باستخدام الوسائل الفنية لتنشيط الكربون . ومن ناحية أخرى أُجريت

فحوص تجريبية للتعجيل التجميعي للأيونات (يد ، ك ، ن) وذلك من مصدر أيونات جيد التمركز في اتجاه مجرى ثنائي حزمة الكترونات نسبية مباشرة[١١]. وتُنتَج الأيونات إما في سحابة غار جيدة الانحصار من صمام هبَّات (puff valve) سريع الارتفاع ، أو من مادة صلبة موضوعة خلف المصعد لتُصدم بنبضة ليزر ١ جول قصيرة . وباستخدام نبضة لحزمة الكترونات ٢ر١ م إف و٣٠ كيلوأمبير ، اتساع ٣٠ نانوثانية ، لوحظت بروتونات ١١ م إف وأيونات نيتروجين ٢٠ م إف (بواسطة تشخيصات تنشيط الرقائق) عندما أطلقت حزمة الالكترونات خلال سحابة الغار الجيدة التمركز ، كما لوحظت أيونات كربون ٢٠ م إف عندما أطلقت الحزمة خلال بلازما الكربون المنتجة بالليزر . وقد أمكن الافادة من مثل هذه الحزم النشيطة للأيونات الثقيلة في تطبيقات الاندماج .

والوسيلة الفنية الأخرى لتعجيل الأيونات المجمعة في مجال مغناطيسي قوي ، هي حقن حزمة الكترونية كثيفة بسرعة نسبية في ميل للغاز (gradient gas) مثلما يستخدم في جهاز بجامعة كاليفورنيا[١٢] . ويكون الميل بتنبيض غار الهيليوم قريباً من لوح المصعد مكوناً بذلك صورة جانبية للضغط تقل عن لوح المصعد (٢ تور نزولاً حتى ٥٠ ملي تور عند ٧٠ سم من المصعد) . وقد تم الكشف عما يصل الى ١٠^{١١} من جسيمات ألفا بطاقة ١٤ م إف على نترات السيليولوز .

والواقع ان الميزة الواضحة للجسيمات المعجلة بالتجميع تكمن في تحقيق طاقات أعلى للأيونات بأقل تزويد للقدرة .

الحزم المعجلة بالليزر (Laser-Accelerated Beams) :

لقد اقترح مخطط آخر للتعجيل المجمع الى طاقات عالية للالكترونات في جهاز مندمج الحجم (١ سم تقريباً) مستغلاً نبضة ليزر قصيرة[١٣] ، حيث تنتشر

نبضة ضوئية في بلازما بسرعة للمجموعة مقدارها $ع_{ض} \left(1 - \frac{\omega^{2}_{بلازما}}{\omega^{2}}\right)^{\frac{1}{2}}$ كما أن قوة الثقل الدافعة للفوتونات تترك وراءها «ذيلا» من موجات البلازما على شكل أثر للجسم المتحرك. وتكون سرعة الطور لموجات البلازما هذه هي ذاتها كسرعة المجموعة، أي قريباً من ولكنها أقل قليلا من سرعة الضوء ($ع_{ض}$). وتعتبر موجات البلازما معجلات فعالة للالكترونات الى طاقات عالية. ومن المستطاع حساب الطاقة القصوى التي يمكن أن يكتسبها المعجل باستخدام تحويل «لورينتز» لتكون $طا = \frac{2ك ع_{ض}}{طا^{2}_{صفر}}$، وبشعاع ليزر نيودميوم: زجاج والمركز الى 10^{18} وات/سم^{2} وبلازما بكثافة 10^{19} جسيم/سم^{3}، فان تعجيل الكترونات الى ٢٠٠ م إف يأخذ مسافة قدرها ١٥ر٠ سم وهذا مثل رائع لما يمكن أن يتحقق من طاقات مرتفعة للجسيمات في أجهزة تعجيل غاية في الصغر. ومن الطبيعي أن هذا يعني اقتصاديات أفضل كثيراً لتطوير معجلات الجسيمات.

٤ أ ٢ اقتصاديات تطبيقات المعجلات

لقد أُعطي مسح في الباب الثاني لتطبيقات المعجلات في المجالات المختلفة. وفي العادة تُعالج الجوانب الاقتصادية لمثل هذه التطبيقات لكل حالة خاصة، كما تُقيّم المنافع في ضوء المتغيرات المختلفة. فعلى سبيل المثال، تعتمد الجرعة الاشعاعية على قدرة الحزمة المستغلة لتطبيق معين، أي على طاقة الحزمة وتيارها. وهذا بدوره سيحدد حجم المعجل وتبعاً لذلك تكلفته. وسيتمثل استثمار التكلفة الثابتة في تكاليف المعجل وملحقاته. ويعتبر هذا ميزة اقتصادية اذا قورن بمصادر اشعاعية تضمحل قوتها مع الزمن، مثل الكوبالت ـ ٦٠. والمزايا الأخرى هي مرونة الاستغلال المتمثلة في الطاقة والكثافة المتغيرين، والتسديد المحكم للحزمة المعجلة، وفي بعض المعجلات امكانية انتاج النظائر المشعة أيضاً. ومن الطبيعي أن المصروفات الجارية أعلى، ولكننا لو اعتبرنا عمر الماكينة والاقتصاد في الانتاج طوال عمرها، فان اقتصاديات

المعجل عندما يمكن استخدامه ، سيثبت أنها أفضل كثيراً . ومع ذلك فيجب أن يذكر أنه بالرغم من أن اقتصاديات استخدام المعجلات يمكن أن تكون أفضل من الطرق التقليدية ، إلا أنه يوجد حالات حيث تكون الوسائل الفنية للمعجلات إما أنها ما زالت في مرحلتها التجريبية ، أو أن تقنية التشعيع ليست مقبولة بعد (بعض حالات حفظ الطعام مثلا).

وسيعالج فيما يلي بعض تلك التطبيقات التي أشير اليها مسبقاً في الباب الثاني وذلك من وجهة النظر الاقتصادية.

المعالجة الاشعاعية (Radiation Processing):

عندما تحدثنا عن المعالجة الاشعاعية وعن مزايا استغلال اشعاع الالكترونات ، ذُكر أن احدى التطبيقات المعطاة في هذا الشأن كانت صناعة الطلاء ومعالجة الطّليات العضوية. ومن الممكن أن تثبت المعالجة الاشعاعية للطلاء أنها أعظم الوسائل اقتصاداً للحصول على انبعاثات ذات صفوف منخفضة. ونظراً لأن الطلية المعالجة اشعاعياً تكون بصفة أساسية نظاماً بلا مذيب ، فلن يتطلب الأمر كميات كبيرة من الحرارة لما بعد المشعلات أو أنظمة غسل الغاز حتى ينظف ركام الغازات. ومع ذلك ، فان قبول المعالجة الالكترونية صناعياً سيستمر معتمداً على الاقتصاديات المقارنة وعلى قدر ما يتضح من امكانية الاعتماد عليها ؛ وكنتيجة لذلك فان طريقة معالجة نظام هذه العملية سوف يكون حرجاً. ويبدأ النظام بالطلية والوسيلة الفنية لتطبيقها ، وتتقدم من خلال استعمال وتقديم الانتاج الى مصدر الطاقة ، والسيطرة على مصدر الطاقة لانسياب الانتاج ، وأخيراً الامساك بالانتاج المعالج.

اعتبارات التكلفة لأنظمة المعالجة الالكترونية:

كما ذكرنا آنفاً يوجد عاملان رئيسيان يتعين بهما نوع نظام المعالجة الالكترونية المطلوب لعملية صناعية ، أولهما فلطية وتيار الحزمة. فالفلطية ،

أو الطاقة تعين معدل الانتاج . والجرعة المطلوبة لتطبيق ما تكون عاملا محدداً أساسياً في تعزيز تكلفة المعالجة ، وتقاس بدلالة كمية طاقة الاشعاع الممتصة بوحدة الكتلة للمادة (حيث يكون « الراد » rad » وحدة الجرعة ، ويعرّف على أنه طاقة امتصاص ١٠٠ ارج/جم من المادة ، ١ ميجاراد = ١٠٦ راد) .

كذلك يمكن أن يعبر عن الجرعة الممتصة بدلالة الحرارة الكهربية أو القدرة[٤] . لذلك يمكن التعبير مباشرة عن القدرة الكهربية من معجل بدلالة أرطال المادة التي تعالج في الساعة لمستوى اشعاعي معين عند الكفاءة النظرية . وهذه العلاقة هي : ١ كيلووات = ٧٩٥ رطل ميجا راد/ ساعة . ويمكن التنبوء بمعدل الانتاج الحقيقي بدقة وذلك بتطبيق معامل تصحيح لكفاءة الامتصاص . وقد أجرى جانت وهوفمان[١٤] تقديرات لتكلفة أنظمة الاشعاع واثبتا أنها كانت تتناقص مع التكلفة للكيلووات لتتراوح بين ٢٥٠٠ دولار و٧٠٠٠ دولار ، وأن تكلفة رأس مال تركيبات المعدات تتراوح بين ٤٥٠٠ دولار و٣٥٠٠٠٠ دولار . كما انهما أعطا تكاليف نموذجية للوحدة وذلك لعملية الترابط المتعارض في البوليمرات مُؤسَّساً على عائد خمس سنوات من رأس المال وتشغيل ورديتين في السنة ، متراوحاً بين ٥ر٤٠ سنت/ رطل . ومع ذلك ، فكما ذكرنا في الباب الثاني ، فان العامل الأعظم حيوية الذي يساهم في التنمية السريعة لأنظمة الاشعاع هو المقدرة على أن تتكامل عملية الاشعاع مباشرة في خطوط العمليات المتواجدة فعلاً .

وعلى الجانب الآخر ، أثبت تعقيم المؤن الطبية اقتصادياتها باستخدام مصادر الاشعاع في مقارنتها بوسائل التسخين أو الوسائل الكيميائية . كما أن الانتاج على نطاق واسع للحاويات البلاستك الرخيصة والمؤن الطبية الأخرى المطلوبة بكميات كبيرة تحت أحوال طارئة ، كما في الحروب تحقق أفضل مزايا اقتصادية فضلاً عن التوفير في الوقت .

حفظ الغذاء بالتقنية الاشعاعية:

إن التغليف المعقم للطعام يُقيَّم على أنه نظام تعقيم عديم التسخين. وتشير جميع الدلالات حتى الآن الى صناعة الطعام على أنها مُستخدماً كبيراً للغاية للاشعاع الالكتروني، بسبب سرعاتها على الدوام وتكاليف الوحدة المنخفضة. ويمكن أن تفهم اقتصاديات حفظ الطعام اذا علمنا أن التشعيع ينقذ معظم الفاقد الناتج عن التلف والذي يصل ٣٠٪ من الانتاج الكلي في بعض الأماكن. ولقد أُنشئت مراكز تشعيع في بلدان مختلفة لحفظ غذاء البحر (الأسماك) والخضروات والفواكه والزهور. وفي العديد من الحالات لا يكون استخدام المبردات لحفظ الطعام عملياً، ولا هو اقتصادي، وعلى الأخص لو أن أصناف الطعام المبرد ستُنقل. ومن المقدر أن تكلفة تشعيع أصناف الطعام لا تزيد عن ٠ر٥٪ من تكلفة التخزين بواسطة المبردات. وعلاوة على ذلك تخضع بعض الأغذية لتغييرات في النوعية، واللون وأحياناً في النكهة عندما تُبرد لمدة طويلة.

إن تشعيع البطاطس، على سبيل المثال، يمنع فقد السوائل والتزريع والتلف. وتبعاً لذلك فان عمر تخزينها يُزاد، كما يقلّل الفواقد في المحصول. والتخزين بالتبريد باهظ التكاليف كما ذُكر آنفاً. هذا وتستخدم مستويات جرعة تتراوح بين ١٠٫٠٠٠ و١٥٫٠٠٠ راد لتشعيع البطاطس.

كذلك يفسد البصل بسرعة نتيجة التزريع الذي يحدث بعد الحصاد ببضعة شهور ويفقد تبعاً لذلك بعضاً من وزنه لينتهي بتلف سريع. والتشعيع بـ ٦٠٠٠ راد يوقف تزريع البصل بقيمة ٧٧٪ لمدة ستة شهور، و٣٠٪ لسنة واحدة مقابل صفر ٪ للبصل الغير مشعع.

وفي بعض الحالات ترش مادة كيميائية على البصل بمعدل ٥٠٠ جزء في المليون قبل التشعيع لمنع التزريع تماماً. وبالمثل فان تشعيع الثوم يوقف التزريع والتحلل ويمكن أن يزاد زمن تخزين البرتقال شهرين أكثر بواسطة التشعيع

بدون التأثير على محتواه من فيتامين ج أو السكر. كما أن زمن تخزين المشمش يمكن أن يزاد ٢٠ يوماً بواسطة التشعيع.

وتتلف الأغذية البحرية بسرعة ولا يمكن تخزينها لمدد طويلة في حالة طازجة. وقد أظهرت دراسات تجريبية في العديد من الدول أن التشعيع بمستويات عالية (عالياً الى ٢ مليون راد) يمد عمر التخزين الى عدة شهور. ويمكن استخدام جرعة أقل مستوى للتخزين لمدد أقصر. وفي الدول النامية، على الأخص الدول الحارة، تكون الوسائل الفنية للتشعيع من أجل حفظ الطعام مجدية اقتصادياً لانقاذ ٣٠٪ من الطعام الذي يفقد سريعاً بسبب التلف في الجو الحار، ويكون معدل الاستهلاك مرتفعاً عادة، ونتيجة لذلك يمكن أن يستخدم تشعيع الجرعة المنخفضة للتخزين لزمن محدود من أجل اقتصاديات أفضل.

ولقد أصبح تشعيع الحبوب لقتل الحشرات والجراثيم الضارة وسيلة فنية شائعة الاستعمال والتي تستخدم حالياً لتنقذ نسبة هائلة من المحاصيل.

توليد الوقود الانشطاري باستخدام معجلات الطاقة العالية:

أُشيرَ في الباب الثاني الى التكلفة المتصاعدة لليورانيوم - ٢٣٥ وأنواع الوقود الحفرية الأخرى، والتي جددت الاهتمام في استخدام معجلات توليد يورانيوم - ٢٣٣ أو بلوتونيوم - ٢٣٩. ولقد أجرى جراند وآخرون(١٥) بعض تقديرات التكلفة التي أكدت أن اقتصاديات «المعجل - المولد» ليست واضحة تماماً. وعملوا مقارنة بين سعر اليوم وقدره ٤٠ دولار/ رطل لـ $يو_٣أ_٨$ الذي يجعل تكلفة يو - ٢٣٥ حوالي ٣٠ دولار/جم، وتقديرات التكلفة المبدئية لوقود «توليد المعجلات» قدره ١٠٠ دولار الى ٢٠٠ دولار للجرام والذي يعتبر غير منافس. ومع ذلك فان التطويرات المستقبلة للمعجلات من أجل تحويل المواد الخصبة (مثل ثوريوم - ٢٣٢) الى مواد انشطارية (مثل يورانيوم

٢٣٣) (أو يو ـ ٢٣٨ الى بلو ـ ٢٣٩) يمكن أن تحقق اقتصاديات أفضل . ومن ناحية أخرى ، يمكن أن يتطور وضع الطاقة في المستقبل بما سيحفز الى انتاج أكثر من الوقود النووي وتعزيز برنامج محطات القوى النووية . ان اشارات هذا الوضع قد خلقت سابقاً مع بوادر أزمة الطاقة أمام العيان . في هذه الحالة نرى أن معجل توليد مُصمَّم بحزمة بروتونات ١ ب إف ، ٣٠٠ ملي أمبير موجه على هدف ثوريوم أو يورانيوم مستنفذ يمكن أن ينتج أكثر من ١٠٠٠ كيلوجرام/سنة من وقود يو ـ ٢٣٣ أو بلو ـ ٢٣٩ ـ وهذا سيزود وقوداً كافياً لدعم ما قيمته ٣٠٠٠ الى ٦٠٠٠ ميجاوات كهرباء كقدرة لمفاعل تقليدي بما يتوقف على دورة الوقود ونوع المفاعل المختار . وتُحسَّن اقتصاديات مثل هذه المحطة باعتبار قدرة حزمة البروتونات التي ـ في حالة ١ ب إف ، ٣٠٠ ملي أمبير ـ تبلغ ٣٠٠ ميجاوات تتحول في الهدف الى حرارة ، فضلا عن الحرارة الناتجة بواسطة النيوترونات المتعاقبة والمقدرة بحوالي ١٢٠٠ ميجاوات حراري كما أنها متاحة للاسترجاع من أجل انتاج قدرة كهربية والتي بدورها يمكن أن تُغذّى خلفياً لتزويد المعجل بالقدرة .

والدراسة الأكثر حداثة في نفس المختبر هي المعجل الخطي مثري الوقود لاعادة التوليد («LAFER» Linear Accelerator Fuel Enricher Regenerator) ومحول نواتج الانشطار (من عناصر الى عناصر اخرى) (Fission Product Transmuter) حيث يستطاع جعل البروتونات العالية الطاقة الخارجة من المعجل الخطي تتفاعل مع هدف من الرصاص المنصهر لتنتج نيوترونات الشظايا والتبخر . ومن المستطاع بعد ذلك ان تمتص النيوترونات في وقود مفاعل الماء الخفيف المحيط بها لينتج بلو ـ ٢٣٩ الانشطاري أو يو ـ ٢٣٣ من يو ـ ٢٣٨ أو ثو ـ ٢٣٢ الخصب وذلك في موضعها الأصلي . ويستخدم عنصر الوقود في مفاعل قوي من نوع الماء الخفيف . وتعتبر اقتصاديات الوقود المنتج بهذه الطريقة مماثلة لتلك التي أجريت سابقاً[١٥] ، وقد أُثبِت أن استخدام

المعجل الخطي في دورة الوقود النووي بصفتيه كمنتج للوقود وكأداة لادارة انتاج الانشطار يبدو وكأنه الحلقة المفقودة في التطوير الطويل المدى لطاقة الانشطار النووي.

اقتصاديات التحليل الغير تخريبي للمواد الانشطارية:

لقد كان المعجل الصغير استثماراً قيماً لتطوير الوسائل الفنية لتحليل المواد الانشطارية من أجل دعم برنامج الضمانات النووي **Nuclear Safeguards Program**. وتستخدم هذه الوسيلة الفنية عدَّ النيوترونات المتأخرة (delayed، neutrons) المنتجة بالانشطار والتي تقدر قيمتها ابتداء ٧ر٠٪ الى ٤٪ من كل النيوترونات وأعمال نصفية تتراوح بين ٢ر٠ و٥٥ ثانية. وقد استخدم معجل ديوترونات ٣٥٠ ـ ك إ ف لهذا الغرض[١٧]، وجُهز المعجل بنظام تنبيض مصدر الأيونات قادر على توليد نبضات ٥٠ ملي ثانية والتي كانت مطلوبة لتطوير وسيلة عدٍّ فنية للنيوترونات المتأخرة. وفي تفاعل يد٣ (يد٢ ، ن) هـ٤ ولِّدت نيوترونات ١٤ ـ م ار ف واستخدمت لتحليل مواد نووية في عبوات مختلفة.

ان اقتصاديات هذه الوسيلة التقنية قُيِّمت من الخبرة في تحليل نوع من الوقود النووي الذي يوضح استغلال الطريقة[١٧]. ويُزوَّد الوقود للمفاعلات عالية الحرارة المبردة بالغاز، بعناصر محتوية على كرّيات مطلية بكاربيد السيليكون من مزيج كاربيد اليورانيوم المثرى ومن كاربيد الثوريوم. ويُقصد من هذه المادة أن تكون عالية المقاومة للمداهمة الكيميائية. وكنتيجة لذلك، يتكلف التحليل الكيميائي من ٢٠٠ دولار الى ٤٠٠ دولار لعينة مكونة من قليل من السنتيمترات المكعبة المحتوية على حوالي ٢٥٠ ملي جرام من يو ـ ٢٣٥ وجرامات عديدة من الثوريوم[١٧]. وبسبب مشكلات الاذابة يكون لنتائج التحليل الكيميائي حالياً دقة بحوالي ١٪ فقط عند مستوى واحد . ويمكن تحليل هذه الكريَّات الى نفس الدقة بالتداخل مع النيوترونات والعد

النيوتروني المؤجل والتغذية الداخلة لخمسين عينة في اليوم. واذا اعتبر المرء ٧٥ دولاراً/ساعة كتقدير معقول لتكلفة تشغيل معجل صغير، فان تكلفة تحليل واحد تأتي الى أقل قليلا من ١٥ دولار.

المعجلات المتعددة الأغراض:

ان الميزانية المتعلقة بمعجلات الجسيات العملاقة تكون من الضخامة بحيث أن مثل هذه الامكانات الكبيرة يستفاد منها لأكثر من مجرد إجراء بحوث الفزياء النووية. ولقد رأينا في الباب الأول أن مركب معجل « فيرميلاب » الـ ٥٠٠ ـ ب إ ف والذي يوجد به أكثر من منطقة تجريبية واحدة يعمل على الافادة من حزمة معجلة الخطى في الطب النيوتروني لعلاج السرطان. كذلك فان التصوير بالأشعة لمواد خاصة هو تطبيق آخر لحزمة أيوناته.

ولقد فوضل « موقف » حزمة سيكلوترون « تريامف»(TRIUMF) بحزمة ٥٠٠ ـ م إف و ١٠٠ ميكروأمبير من أجل تزويد تشكيلة من الامكانات للبحوث الأساسية والتطبيقية. وتتضمن هذه: امكانات لتشعيع عينات بواسطة بروتونات عالية الطاقة للبحث ولانتاج النظائر المشعة، إمكانات لتشعيع عينات بنيوترونات ذات طاقات تبدأ من الحرارية حتى ٥٠٠ م إف، وحزم نيوترونات مسددة من قلوب التجميع، ذات طاقات حرارية بصفة أولية ولكن بطاقات فوق الحرارية كذلك وأعلى. وقد نتج عن ادماج هذه الامكانات في وحدة واحدة تصميم صغير بوفورات هائلة في التحجيب والحيز. وتحتوي الوحدة على هدف توقيف من رصاص منصهر محاط بمهدىء يد٢ أ / يد٢ أ وعاكس من يد٢ أ بالاضافة الى تحجيب من حديد وخرسانة. هذا وتنقل معظم قدرة الحزمة (≅ ٥٠ كيلووات) بالحمل الحراري الطبيعي في الرصاص المنصهر الى جدار الهدف، ومن هناك تنقل بالغليان النووي الى مهدىء يد٢ أ المحيط بها.

وفي جامعة ناجويا باليابان يُصمّم معجل بالغ القوة، عالي الطاقة (١٠ ب إف)، عالي التيار (١٠ أمبير) للأيونات الثقيلة في نظام مفاعل اندماج - مجمّع. ان هذا المركب المعقد يأخذ اعتبارات خاصة لبعض الاستخدامات الأخرى المتعددة الأغراض من البحوث النووية، وبحوث الكيمياء الحيوية والتطبيقات الطبية. وهذا النظام يأخذ دور ما يسمى بمصنع الأيونات الثقيلة وبامكانية اختبار تُنتج حزمة من الأيونات الثقيلة الكثيفة بطاقة مختزنة للاندماج قدرها ١٠٠ كيلوجول. وفي أعمال تصميمه فُحصت عدة أنظمة مراكمات لجعل التكلفة اقتصادية.

٤ ب الجوانب الاستراتيجية لمعجلات الجسيمات

ان معجلات الجسيمات تتبوأ مكانة استراتيجية هامة مع الاتجاه الجديد نحو استخدامها في مجالات ذات فحوى كما في توليد الوقود النووي وفي الاندماج النووي الحراري، أو في تحليل المواد الانشطارية لدعم برنامج الضمانات النووي فلنأخذ مثلا مشكلة الوقود النووي والدور المتوقع أن تلعبه المعجلات - المولدات في حل مشكلات الطاقة. ففي المقام الأول، يُواجَه العالم بزيادة مستمرة دون تحكم في أسعار النفط، والتي تسبب حالياً قلقاً بالغاً لكل من الدول الصناعية المستهلكة والدول النامية الغير منتجة. إن هيمنة النفط على صورة عالم الطاقة قد أثار شكوكاً خطيرة عند الدول المستهلكة فيما يتعلق بحكمة الاعتماد على مصدر متناقض وعلى التصعيد المستقبل بواسطة الدول المنتجة. وكنتيجة لذلك تركز الاهتمام عالمياً على الطاقة النووية وعلى مصادر الطاقة البديلة بنوعيها المتجدد وغير المتجدد. غير أنه اذا فحصنا هذه المصادر البديلة فسوف نجد في الوقت الحاضر إما أن تقنيتها ليست مطورة تجارياً، أو أن كفاءات الأنظمة تكون منخفضة جداً بما يجعلها بدون قيمة اقتصادية. وبناء عليه، فان كثيراً من دول العالم تتحرك قدماً نحو اقتناء محطات قوى انشطار نووية. وفي الوقت الحاضر تمثل القدرة النووية حوالي ٢٪ من مؤن

العالم الأولية وحوالي ٨٪ من انتاج طاقته الكهربية. ومن المتوقع أن تنمو القدرة النووية الحالية المقدرة بحوالي ١٠٥ر٠٠٠ ميجاوات كهرباء بمُعامل يتراوح بين ١٠ و١٥ بين الآن وعام ٢٠٠٠[١٩]. ولكن محطات القوى النووية تحتاج الى وقود نووي، وهكذا يصير توفر اليورانيوم في العالم وموارده الكامنة قضية حيوية. وتبين دراسات حديثة[٢٠] أن الاستهلاك العالمي الحالي لليورانيوم المقدر بحوالي ٢٩ر٠٠٠ طن يمكن أن يزيد الى ما بين ١٧٨ر٠٠٠ و٣٣٨ر٠٠٠ طن بحلول عام ٢٠٠٠. على أن الطلب الكلي المتجمع حتى عام ٢٠٠٠ سيكون حوالي ٣ مليون طن يورانيوم، ولكن المتطلبات فيما بعد عام ٢٠٠٠ أعظم كثيراً، ومن المحتمل بما قيمته ١٠ مليون طن حتى عام ٢٠٢٥. لذلك، ستكون هناك أزمة يورانيوم خلال ٤٠ سنة، مثلما توجد أزمة نفط. علاوة على ذلك، تعتبر تثرية اليورانيوم ومعالجته واحدة من التقنيات المعقدة والباهظة التكاليف. وفي ضوء هذه الاعتبارات يمكن القول أن توليد اليورانيوم بتحويل المواد الخصبة الى مواد انشطارية باستخدام المعجل المولد سيكتسب أهمية أكثر. ولقد نوهنا في الجزء السابق أن اقتصاديات توليد اليورانيوم يمكن تحسينها بتطوير اضافي لتقنيته. ولكن مفهوم «المعجل المولد» هو أسلوب عملي لتحويل المادة الخصبة الى وقود انشطاري. وبالرغم من أن تصميم وبناء المعجل الخطي المطلوب ليس مهمة سهلة، الا أنه ممكن بما عليه حالة فنون التقنية ليومنا هذا. والهدف كذلك، لا يبدو أنه يقدم أي قيود أساسية.

وعلى نفس خط الطاقة ومحاولات حل مشاكلها، تستخدم المعجلات في مجال الاندماج النووي الحراري. وقد شرحنا في الباب الثاني الوسائل التي تستغل بواسطتها طاقة الجسيمات المعجلة إما لتُسخن البلازما أو لتستحث الاندماج مباشرة. ففي الحالة الأولى، يستخدم بنجاح حقن الحزم المتعادلة لاعطاء عشرات من الميجاوات من قدرة الحزمة من أجل تسخين البلازما بما يؤدي الى

زيادة ضعفين أو ثلاثة أضعاف في درجة حرارة الأيونات (وكما ذكرنا من قبل جاء بالتقارير العلمية[٢١] زيادة واحد ك إف في درجة حرارة الأيونات بسبب الحقن). وقد تعززت الجدوى العلمية لتوليد القدرة بالاندماج، وينشأ حالياً في مختلف المختبرات مفاعلات اندماج من النوع المبدئي. ومن ناحية أخرى أحرز تقدم في الحصار الجمودي بحزم الالكترونات. وكما ذكرنا في الباب الثاني، أبلغ في عام ١٩٧٦ عن أول اندماج سوفييتي مستحق بحزمة الكترونات في نفس الوقت تقريباً عندما طورت مختبرات سانديا بأمريكا تصميم هدف جديد أدى الى أول اندماج حراري أمريكي مستحث بحزمة الكترونات. على أن اندماج حزمة الأيونات تدرس حالياً بكثافة بواسطة أيونات يد$_{٦}^{+}$ من معجل طاقة عالية يعطي ٨ ب إف/ أيون. وفي هذه الحالة يكون نتاج نيوترونات الاندماج ٣ × ١٠^{١٧}/ نبضة[٢٢].

اذا تسنى لمفاعلات الاندماج أن تصلح للاستعمال التجاري في وقت ما في القرن التالي، فيمكن للمعجلات أن تتبوأ وضعاً استراتيجياً في قضية الطاقة. والمجال الآخر الذي تكتسب فيه المعجلات اهمية استراتيجية هو استخدامها لتطوير وسائل فنية لتحليل المواد الانشطارية في اطار برنامج الضمانات النووي. ولكي تخدم هذا الغرض، تعتبر معجلات كوكروفت والتن وفان دي جراف مرضية تماماً.

وتكمن القضية في أن المشتركين على النطاق العالمي في صناعة القوى النووية قلقون للغاية من امكانية الانحراف الغير قانوني للوقود النووي من دورة قدرة المفاعل الى أيدي المنحرفين، سواء كان أولئك المنحرفون دولاً مرتكزة على عدوان نووي، أو مجموعات تخريب سياسية، أو مؤسسات اجرامية تسعى للربح الغير شريف. وعلى النطاق الدولي تسبب هذا القلق في الحث على تنفيذ معاهدة عدم انتشار الأسلحة النووية والتصديق عليها، وهي التي تمنع انتشار تقنية الأسلحة النووية بين الموقعين على المعاهدة، وتتطلب أن

يلتزم جميع الأطراف في المعاهدة بمسئولية صارمة تجاه المواد الانشطارية التي في حيازتهم. لذلك فمن المطلوب أن توضع تنظيمات شديدة موضع التنفيذ لحماية المواد الانشطارية ولتحمل مسئوليتها بواسطة الافراد المسموح لهم بحيازة هذه المواد. وتعرف هذه الاجراءات من الوقاية والمسئولية قبل المواد النووية بالضمانات النووية. ويعتبر جزء من «الضمانات النووية» برنامج صارم للبحوث»[١٧] مؤدياً الى وسائل دقيقة، مناسبة التوقيت، فاعلية التكلفة لتحليل المواد الانشطارية في أشكالها العديدة، بما في ذلك ركاز الخام وتغذية مصانع الوقود باليورانيوم المزود وقضبان الوقود المتكاملة والوقود المستنفذ، والمتخلفات والنفايات من جميع النقاط في دورة الوقود.

ان الوسائل الفنية للتحليل الغير مدمر باستخدام المعجلات تلعب دوراً هاماً في هذا البرنامج، نظراً لأن هذه الوسائل الفنية أقل تكلفة من التحليل الكيميائي، وتسمح بقياس ١٠٠٪ للموجودات (لو قورنت بعملية أخذ العينات والتحليل الكيميائي)، كما يمكن تطبيقها بأدنى درجة من التداخل مع دورة الوقود.

المراجع

١ - "A Superconducting Dipole for the Fermilab Switchyrad", R Dixon, et al., Proceedings of the 1979 Particle Accelerator Conference, San Francisco 12-14 March, 1979, IEEE Trans. Nucl. Sci., June 1979, Paper J-14.

٢ - "A High Field Superconducting Beam Transport in a B.N.L. Primary Proton Beam", J. Allinger, et al., same conference proceedings of ref. 1, Paper J-13 A.

٣ - "Advanced Superconducting Magnets for High Energy Physics", J Allinger, et al., Same proceedings of 1.ref. v, Paper J-13B

٤ - ¯"Superconducting Accelerating Cavities for High Energy $e^+ - e^-$ Storage Rings", W Buer, et al., same proceedings of ref. 1, Paper G-31

٥ - "Production Testing of Isabelle Ring Magnets", E Bleser et al., same proceedings of ref. 1, Paper K-9A.

٦ - 'The Stanford Superconducting Recyclotron, J.R. Galarco, et al., same proceedings of ref. 1, Paper G-29.

٧ - "Pulse Power Conditioning System for 5 Mev, 10KA, 50 ns Induction Accelerator", L.Reginato, et al-, same proceedings of ref. 1, Paper 1-6 B.

٨ - "Design of a Pulsed High Current 2.5 Mev Electron Gun", RE Hester, et al., same proceedings of ref. 1, Paper L-6A.

٩ - "A New Collective Particle Accelerator", M Friedman same proceedings of ref. 1, Paper L-8.

١٠ - "Collective Ion Acceleration Produced by Injecting A Rotating Relativistic Electron Beam into Neutral Hydrogen", J.D. Sethian, et al., same proceedings of ref. 1, Paper L-11.

١١ - "Experimental Studies of Heavy Ion Collective Acceleration at the University of Maryland", W.W. Destler, et al., same proceedings of ref. 1, Paper L-5.

١٢ - "Collective Ion Acceleration in a Strong Magnetic Field", R. Mako, et al., same proceedings of ref 1. Paper L-13.

١٣ - "An Electron Accelerator Using A Laser", T. Tajima, and J. Dawson, same proceedings of ref, 1, Paper L-9.

١٤ - "Radiation Processing", E.D. Gantt and C.R. Hoffman, 1972-1973 Modern Plastics Encyclopedia.

١٥ - "The Accelerator Breeder, An Application of High Energy Accelerators to Solving Our Energy Problems", P. Grand, et al., IEEE Transaction on Nuclear Science, Vol. NS-24, No, 3, June 1977, P. 1043.

١٦ - "The Linear Accelerator Fuel Enricher Regenerator and Fission Product Transmuter", M. Seinberg et al., same proceedings of ref., 1, Paper B-5.

١٧ - "The Role of the Small Accelerator in the Nondestructive Assay Laboratory", A.E. Evans, et al., Proceedings of the Conf. on Application of Small Accelerators, Vol. II, North Texas State University, Denton, Texas, Oct. 21-23, 1974, p. 209.

١٨ - "The TRIUMF Thermal Neutron Facility", J.J. Burgerjon, et al., same proceedings of ref. 1, M-5.

١٩ - "Nuclear Power in Developing Countries", International Atomic Energy Report Submitted to the 1st Arab Energy Conference, Abu-Dhabi, March 4-8, 1979.

٢٠ - "Speculative Potential for Uranium Resources in Arab Countries", J.

Cameron, Paper presented to the 1st Arab Energy Conference, Abu-Dhabi, March 4-8, 1979.

(See Reference 3, Chapter II, Section II E). ٢١ -

(See Reference 6, Chapter II, Section II E). ٢٢ -

الباب الخامس

احتياجات الدول النامية

مقدمة :

تتحقق أهمية تطبيقات المعجلات في المجالات المختلفة في الأبواب الثاني والثالث والرابع ، ويكون من الجلي مزاياها الاقتصادية في العديد من استخداماتها ، كما أن تأثيراتها الاستراتيجية قد تعززت . وكما رأينا في الباب الأول ، تمثل معجلات الجسيمات تقنيات غاية في التعقيد ، وهي لذلك تنطوي على ميزانيات ضخمة . وعلاوة على ذلك فان واحداً من أكثر العوامل حيوية لمعجلات الطاقة العالية هو الحاجة الى قائمة موسعة للغاية من العلماء والمهندسين والفنيين لتزويد هيئة المختبرات ولاجراء البحوث وتشغيل الأجهزة . ان كل هذا بعيد بما يتجاوز قدرات دولة نامية . ففي المقام الأول يوجد نقص خطير في الفنيين والأفراد المدربين ، فضلا عن انعدام المعرفة في الكثير من مجالات التقنية المتعلقة بمعجلات الجسيمات . واضافة الى ذلك لا تستطيع الكثير من الدول النامية التضحية بما يمكنها من تمويل مشروعات لمعجلات ذات أحجام كبيرة . ومثل أي فرع آخر من التقنيات النووية ، ينبغي الحرص في اختيار نوع المعجل بل ومشروع المعجل بأسره . وتثار تساؤلات عما هو المعجل الذي يكون مناسباً أكثرلدولة نامية لتبدأ به في تخطيط قصير المدى ، وما هي التطبيقات التي تكون سليمة أكثر وذلك من وجهات النظر العلمية والتدريبية

والاقتصادية، كذلك ما هو التخطيط الطويل المدى لمشروعات المعجلات بالنسبة للدول النامية.

اختيار معجل لدولة نامية:

يمكن - تفصيلياً - أن يكون المعجل الأول في دولة نامية صغيراً بطاقة قدرها قلة من مئات الكيلو إلكترون فولت. انه بسيط في الانشاء، وسهل في التشغيل والصيانة، كما أنه مناسب للتعليم والتدريب. فالتعليم يغطي مجموعة من مشاكل الفيزياء الذرية والنووية، ويتضمن التدريب المشاكل الفنية التي ترتبط بالتفريغ العالي، الهندسة الكهربية والالكترونية وكل أنواع الوسائل الفنية للقياسات سواء لمتغيرات المعجل أو للجسيمات الثانوية أو للاشعاعات المنبعثة من التجارب.

كما رأينا في الباب الثاني، فمثل هذا المعجل الصغير في مدى طاقة الـ ١٥٠ حتى ٤٠٠ ك إف يمكن أن يغطي مجالاً واسعاً للتطبيقات. والخطة المعقولة لهذا المعجل الأول أن تُختار مواصفاته بحيث تناسب فصلا طويلا من التطبيقات بمراحل متعددة. وكمثل على هذا، فان معجل كوكروفت والتن ٤٠٠ - ك إف بحزمة أيونات موجبة ذات تيار أقصى ٥ ملي أمبير يمكن أن يُزوَّد بمغناطيس تحويل وثلاثة خطوط للحزمة موجهة الى مناطق تجريبية مختلفة. في المرحلة الأولى يمكن لاثنين من هذه المناطق أن تستخدم الحزمة للتعليم والبحث. فدراسات على ديناميكية الجسيمات، وانبعاثية الحزمة، وتوزيع الكثافة ومشاكل أخرى كثيرة تتصل بحزم مستمرة ونابضة ما هي الا مجرد أمثلة لما يمكن عمله حتى يمكن التعرف على خواص الحزم الأيونية المعجلة وبمعدات التعامل مع الحزمة. والمرحلة الثانية في مجال الفيزياء النووية يمكن أن تبدأ بتجارب بسيطة مثل الكترونيات الكشف، كاشفات غرفة التأين وبللورة الوميض، وكاشفات العائق السطحي. بعد ذلك يمكن اجراء تجارب أكثر

تعقيداً مثل التشتت المرن لبروتونات ٣٥٠ ـ ك إف من الذهب ، وقيم « كيو Q » للتفاعلات الآتية ببروتونات ٣٠٠ الى ٤٠٠ ك إف : لث٦ (بر ، هـ٣) α : لث٧ (بر ، α) α ، فو٣١ (بر ، ◌) كب٣٢ . كذلك تكون دراسة حركيات التفاعلات التالية ذات أهمية :

لث٦ (بر ، هـ٣) α ، لث٧ (بر ، α) α ، بالاضافة الى عديد من تجارب أخرى . ويمكن أن يزود تنبيض الحزمة ، وعلى الأخص في المدى الزمني بالنانوثانية ، للافادة من الوسيلة الفنية « لزمن الطيران » (time of flight) .

وفي مرحلة متأخرة يمكن استخدام الخط الثالث بحزمة ديوترونات موجهة الى هدف تريتيوم لينتج نيوترونات ١٤ م إف من التفاعل يد٣ (يد٢ ، ن) هـ٤ ، محولاً بذلك المعجل الصغير الى مولد نيوترونات . ومن المستطاع عندئذ استغلال التطبيقات العديدة للنيوترونات السريعة المذكورة في الباب الثاني ، وعلى الأخص استخدامها في التحليل التنشيطي كُتلياً لعينات في الصناعة والزراعة والطب وفي مجالات عديدة من العلم والتقنية .

وسيتطلب مشروع المعجل هذا اقامة مختبرات أخرى ملحقة والتي ستُطَور وتبسط الخدمات المقدمة بواسطة المعجل ، مثل بحوث تطوير مصدر الأيونات ، تقنية التفريغ العالي والالكترونيات النووية والقياسات .

وحتى هذه النهاية تكون بعض الخبرة قد اكتسبت ، بالاشتراك مع التعود على تقنية المعجل وفيزياء المعجل . ويمكن التحرك خطوة الى الأمام ، إما بعد ـ أو حتى بالتوازي مع ـ المشروع المذكور أعلاه . هذا بأن تقتني معجلا ذا طاقة أعلى في مدى قليل من المليون فلط الكتروني . وقد يكون ذلك معجلا الكتروستاتيا ، من نوع الفان دي جراف ، أو بالتفضيل نوع البيليترون ، ويمكن استخدام هذه الماكينة في التطبيقات التي سبق وصفها في الباب الثاني . وفي مجال الفيزياء النووية . يمكن اجراء بحوث أكثر تقدماً على مثل هذه

الماكينة. وعلى سبيل المثال، يمكن لبعض المشاكل ذات الاهتمام أن تستغل مطيافاً مغناطيسياً لاستخدامه مع المعجل.

ان أحد الاستخدامات الرئيسية للمطياف هو دراسة رنينات النيوترون عن طريق (يد$_{٢}$ ، بر) مع النوايا المتخلفة س^{٣١} ، كب^{٣٣} ، جو^{٤١} . واستعمال آخر غير عادي للمطياف هو قياس مقاطع س^{٣٠} (يد$_{٢}$ ، بر) لحالات الطاقة المختلفة في مستوى الـ م‌إف مع التحرك قدماً في خطوات لزوايا صغيرة لتزويد اختبار للحسابات التقريبية لقنوات « بورن » المُقْرنة. ويمكن دراسة مشاكل مماثلة على رنينات النيوترون بمثل هذا المعجل. وأشعة طيف جاما هي دراسة أخرى مشوقة لمشكلة تستخدم فيها بللورات ص ى (NaI) المتوافقة. كذلك فان دراسات الأشعة السينية للتأين الذري والجزيئي، والتأين في الجوامد ما هي الا أمثلة أخرى لمشاكل البحوث.

وما دام الأمر يتعلق بتطبيقات في مجالات أخرى غير علمية، فان الاختيار لتطبيق ما يتوقف على الأحوال الفردية المعينة للدولة النامية. وفي المقام الأول يكون المطلب المسبق تواجد الأشخاص المدربين القادرين على أعمال تشغيل وصيانة المعجل تحت الاعتبار. كذلك يتوقف الأمر على وفرة الخبراء في مجال التخصص المعني، فضلا عن اقتصاديات العملية المستخدمة لوسائل المعجل الفنية. على أن مجالات التطبيقات الممكنة هي استخدام معجلات الالكترونات لتشعيع المحاصيل مثل البطاطس والبصل، وفي طب السرطان، والتطبيقات المماثلة المذكورة في الباب الثاني.

٥ أ المشروعات المشتركة للمعجلات

ان الخطوة الاضافية، الأكثر تقدمية نحو الاستغلال الأفضل للمعجلات عند طاقات أعلى في الدول النامية يمكن أن تكون بالمساهمة مع مجموعة من دول أخرى في بناء واستخدام معجل متعدد الأغراض تكون طاقته في المدى من

عشرات الـ م إف للأيونات الفردية الشحنة ، ومن المستطاع أن تصل الى مئات الـ م إف للأيونات الثقيلة المضاعفة الشحنة . وكما سيوصف فيما بعد ، فمن وجهات النظر العلمية والتقنية ، وربما المالية ، سوف تزيد هذه الامكانية بشدة مقدرة الدول قائمة بذاتها . علماً بأن التوضيح الممتاز لفائدة التعاون الدولي قد تعزز مسبقاً في حالة مجموعة « سيرن » بجنيف ، المدعمة بثلاثة عشر دولة أوروبية تساهم ـ كما وصفنا من قبل ـ في بناء وتشغيل برنامج البحوث « لسينكروترون الميل المتغير » ، ٣٠ ـ ب إف .

ان مجموعة من الدول النامية ، ولتكن الدول العربية ، يمكن أن تدخل في مشروع مشترك للمعجلات بانشاء مركز للبحوث النووية حول معجل الكتروستاتي ، وليكن من نوع « بيليترون التعاقبي » ، الذي وُصف في الباب الأول (صفحة ٥١) . ان الأسباب خلف اختيار معجل الكتروستاتي ، وليس معجلا خطياً أو معجلا كالسيكلوترون أن الأخيرة ليست كفية بقدر ما يكون البيليترون فهي تستطيع تعجيل أنواع قليلة فقط من الجسيمات المشحونة ، انها أعظم تعقيداً بكثير وهي لهذا أكثر صعوبة في التشغيل ، كما أنها أكثر تكلفة في الصيانة ، كذلك تنتج حزمة صعبة التركيب زمنياً وهي لذلك ليست فعالة في التجارب التي ينبغي أن يلاحظ فيها اثنان أو أكثر لنواتج التفاعل في وقت واحد ، وهي تنتج حزمة ذات طاقة رديئة التحديد والتي تكون عديمة الجدوى لدراسة الأشكال النووية العالية الطاقة (ولهذا يكون تباعد طاقتها عن كثب) . والحقيقة أن المعجل الالكتروستاتي يتميز بالبساطة والمرونة والطاقة العالية المطلوبة . ان البيليترون الالكتروستاتي المقترح يمكن أن يكون له جهد طرفي أقصى قدره ٣٠ مليون ڤلط ، لذلك فان تشكيلة الفصائل الأيونية التي يمكن تعجيلها ، والمدى الممكن للطاقات ـ من ٦٠ م إف لأنوية الايدروجين الخفيفة ، الى ٦٠٠ م إف لحزم أنوية اليود ـ يجعل عدداً كبيراً للغاية من دراسات فريدة رمشوقة في العلوم النووية ممكناً . وتتضمن هذه دراسات لديناميكيات تفاعلات

الأيونات الثقيلة ، التي تعتبر على جانب كبير من الأهمية ، ويجب أن تُفهم قبل أن تجري أي محاولة نظامية لانتاج العناصر « المفرطة الثقل » صناعياً . ومثل هذه العناصر يمكن أن تؤدي الى تقنية للقدرة « فوق النووية » جديدة كلية ، وهكذا تثبت أنها حاسمة في مواجهة أزمة الطاقة المتطورة في العالم .

ان انتاج نظائر مشعة جديدة تماماً (من الوزن الخفيف والثقيل) يكون ممكناً كذلك ، بالاشتراك مع تطبيقاتها الطبية والصناعية والعلمية . وتطبيقات أخرى مفيدة لحزم الأيونات الثقيلة من المعجل المقترح تتمثل في الفحص المباشر لمشكلات في الفيزياء الذرية ، فيزياء الجوامد ، وفي البحوث البيولوجية والطبية ، وتعتبر تطبيقات المعجل في أشباه الموصلات وتقنية الالكترونيات المتناهية الدقة مهمة بدرجة متساوية .

وتسمح حزم الأيونات الثقيلة في الفيزياء النووية بثروة جديدة من الوسائل الفنية والاكتشافات حيث يُعمل على الافادة من الشحنات الكبيرة للحزمة التي تنشىء اثارة « كولوم المضاعفة » للأنوية ولكميات الحركة العالية الزاوية منها والخطية والمميّزة لتفاعلات الأيونات الثقيلة التي تسهل دراسة التصفيف النووي (nuclear alignment) وزحزحة « دوبلر » ، وظاهرة غرس الأيونات (ion-implantation) . كذلك يمكن الافادة من حزم الأيونات الثقيلة في « التنفيق » (tunneling) وتفاعلات النقل والتي تعتبر مفيدة في استنباء منطقة السطح النووي . وبناء عليه ، يمكن أن يتوقع المرء أن مناطق كثيرة جديدة في الفيزياء النووية ، مثل الانشطار المستحث بتأثير « كولوم » ، سيتطور من العمل المستقبل بالأيونات الثقيلة النشيطة . ومن ناحية أخرى ستخلق التفاعلات المتعلقة بالأيونات نظائر مشعة خفيفة مبتكرة والتي تكون نسبة البروتون الى النيوترون فيها مختلفة بشدة عن تلك للأنوية المستقرة الموجودة في الطبيعة . ان مثل هذه النظائر المشعة لديها الكثير ليعلمنا عن القوة النووية ، اضافة الى أهميتها في التطبيقات الصناعية والطبية .

ان مقدرة المعجل على انتاج حزم مستقطبة وغير مستقطبة للجسيمات الخفيفة عند طاقات تبدأ من ٥ حتى ١٠٠ مإف بدرجة ثبات جيدة، واستقرارية عالية للحزمة، وثقة الأداء في التشغيل، ستكون واحدة من أعظم امكانات البحث روعة لتكشف عن معلومات جديدة في هذا المجال المعقد من الفيزياء

كما أن مشكلة تفاعلات النقل (مثل الديوترون داخلاً، والبروتون خارجاً ـ أو تفاعل (يدم، بر) تعتبر مجالاً للبحث جديداً نسبياً والذي يؤمَّل أن يساعد الفيزيائي النووي في الحصول على معلومات واضحة عن أشكال حالات الاثارة النووية.

وسيكون المعجل المقترح امكانية جيدة في استخدامه للدراسات الكيميائية وذلك لفحص مشاكل مثل:

«الموسباور» (Mossbauer) والدراسات المرتبطة به باستخدام اثارة كولوم، أو غرس الأنوية «باعادة اللف» (recoil)، وقياس الطيف الذري للحزمة مع الرقائق وهكذا تتاح دراسة درجات عالية جداً للتأين الذري (مثلا يو+٤٢)، والتشتت الالكتروني من أجل دراسة تقنية للتفاصيل الهامة عن التركيب الذري، وتصادمات الأيون مع الذرة لدراسة انتاج الأشعة السينية التي تكون مختلفة عن الأشعة المميزة.

على أن بعض الاستخدامات الممكنة للمعجل وامكاناته في الدراسات الطبية والبيولوجية هي: أ) تنفذ الأيونات الثقيلة ذات الطاقة المناسبة الى أعماق كبيرة (١٠ ـ ٣٠ سم) في الأنسجة الآدمية، مُرسِّبة كل طاقتها تقريباً خلال مسافة قصيرة قريباً من نقطة توقيفها، وهكذا تقدم وسيلة جديدة ودقيقة لعلاج السرطان.

ومع أن المعجل المقترح ليس من المحتمل أن يكون مناسباً لهذا النوع من العلاج، الا أنه سيزود ما يعرف «بسرير اختبار (test-bed)» حيوي

لدراسات معرفة بيوإشعاعية لتتقن مثل هذا العلاج لاستخدام آمن للآدميين ، ب) تعتبر دراسات علم الوراثة والتأثيرات البيواشعاعية لاصطدام الأيونات الثقيلة على الأنسجة الحية ذات أهمية في حل العديد من المشكلات التي أثيرت في افتراض احتمال وجود حياة على الكواكب الأخرى ، وفي تأكيد ذكر التأثيرات الطويلة المدى للبيوجينيات لرحلات الفضاء المأهولة (تعتبر الأنوية الثقيلة جزءاً هاماً ـ من حيث الطاقة ـ للأشعة الكونية الأولية) . ويمكن لمثل هذه الدراسات للأيونات الثقيلة أن تلقي ضوءاً جديداً على نشوء الحياة على الأرض وعلى كواكب ترابية أخرى .

ويمكن للمرء أن يضيف أن مثل هذه الامكانية المتعددة الاستعمالات قادرة كذلك على فتح مناطق أخرى جديدة للتطبيقات . وعلى سبيل المثال ، يمكن للبحوث التطبيقية التي تجري بواسطة الفيزيائيين والكيميائيين والمهندسين أن يكون لها وقع فوري على التقنيات المتواجدة ، فضلا عن ارساء أرضية عمل لأوجه التقدم المستقبلة في التقنيات التي تعتبر حالياً في طفولتها .

٥ ب التدريب

إن تطوير تقنية معقدة كما في معجلات الجسيمات وذلك على النطاق المحلي كلية قد لا يكون من المحتمل مجدياً أو لا يوصى به في معظم الدول النامية في جدول زمني معقول . والاقتناء من الخارج هو في الغالب الطريقة المستخدمة لنقل تقنيات جديدة وحتى بالنسبة لكثير من الدول الصناعية الصغيرة . ولكن هذا يتطلب ، وعلى الأخص فيما يتعلق بالتقنية النووية ، ارتباطاً حكومياً وتأميناً لاستمرارية تزويد المعرفة والمعدات . وعادة تعطي الاتفاقيات الثنائية والمتعددة الأطراف هذه المتطلبات . علاوة على ذلك فان نقل التقنية بنجاح يتطلب دائماً طرفين : أحدهما الذي لديه التقنية وهو راض عن نقلها ، والآخر الذي يكون قادراً على تلقي واستيعاب التقنية وعازم على بذل الجهد المطلوب ليستكمل النقل . ينطبق هذا على معجلات الجسيمات ، التي ـ كأي تقنية نووية

أخرى ـ تغطي طيفاً واسعاً للتقنيات. ويمكن تقسيم تقنيات المعجلات الى طائفتين: تقنيات مميزة للمعجلات متخصصة، والتي تتطلب تدريباً خاصاً، وتقنيات تقليدية في المجالات المختلفة للوسائل الفنية في الفيزياء والهندسة.

تتعامل الطائفة الأولى مع المشكلات المرتبطة بالحزم المعجلة والمعدات الوثيقة الصلة بها، مثل العدسات الالكترونية (الالكتروستاتية والكهرمغناطيسية)، تشخيصات الحزم (قياس انبعاثية الحزمة ووضعها والمتغيرات الأخرى)، التحكم في الحزمة، مشكلات الفلطية العالية للتعجيل، ومشكلات أخرى عديدة. هذا ويجب اعداد برامج تدريب خاصة لهذه الحالة من أجل تزويد الأشخاص المطلوبين والذين يكونون أصلاً من الطائفة الثانية.

وعلى الجانب الآخر، فان النوع التقليدي من التدريب (مثلا، في الالكترونيات، الهندسة الكهربية، التفريغ العالي، المغناطيسيات،... الى آخره) يمكن أن تتبع القنوات العادية، كما سيفصل فيما يلي. ويمكن مع ذلك أن تُضم في برنامج كلي ليزود المهندسين وهيئة الفنيين المطلوبين لجميع فروع التقنية النووية. ومثل هذا البرنامج يمكن أن ينظم لهيئة الفنيين والمهندسين بعد أن يكونوا قد حصلوا على تعليم عادي في المدارس الفنية أو الهندسية المناسبة. وفي هذا الصدد، يلزم التأكيد على أن متطلبات الأفراد المدربين يجب اعدادها مقدماً بما فيه الكفاية، وأن يدمج تدريبهم في برنامج تدريب بموقع العمل.

اعداد الهيئة القيادية الفنية:

سيتطلب تشغيل وصيانة معجلات الجسيمات هيئة عالية التأهيل على كل المستويات. ان تزويد الأفراد وبدء برنامج تدريب فعال يجب أن يبدأ في مرحلة مبكرة لمشروع المعجل حتى يمكن الحصول على جزء كبير من أعضاء الهيئة في اعداد جيد مسبقاً بينما المعدات الرئيسية للمختبر يتم تركيبها.

وسوف يطور بعد ذلك برنامج التدريب ويعمل على استمراره بانتظام في المستقبل حتى يمكن تحسين مهارة الهيئة باطراد وحتى يمكن تبني تطويرات دولية جديدة في المجالات المختلفة. ويذكر أن تخطيط مثل هذا البرنامج والاشراف عليه يجب أن يؤدى بواسطة متخصصين متمرسين وخبراء فنيين يغطون المجالات التالية:

التصميم الميكانيكي والانشاء (تقنية الورش)، تصميم الالكترونيات والانشاء (تقنية الورش)، نقل الحزمة في المعجلات وفي المناطق التجريبية (يتضمن هذا: بصريات الحزمة، المغناطيسيات، الحارفات، الخطوط التجريبية للحزمة، وسائل تشخيص الحزمة) تقنية التفريغ (مضخات التفريغ، أنظمة التفريغ والقياسات، اختبارات التسرب)، تقنية التبريد الشديد (النيتروجين السائل، حالات التبريد الشديد بالهيليوم السائل). أنظمة التردد العالي، أنظمة التحكم بالحاسبات الآلية، الأمن (الجوانب الميكانيكية، الكهربية، الكيميائية، الأخطار الاشعاعية).

ومن ناحية أخرى، ينبغي أن يتضمن برنامج تدريب المتخصصين الجوانب التالية:

(١) فيما يتعلق بالأفراد العلميين، يجب أن تؤدي دراسات نظرية متخصصة في موضوعات ذات صلة وثيقة بالتخصص وذلك على مستوى دراسات عليا بالارتباط مع جامعة أو معهد علمي طبقاً لبرنامج تم تخطيطه.

(٢) يجب اجراء متابعة دقيقة لعمليات البناء والتجميع والاختبارات لمختلف مراحل تنفيذ المعجل.

(٣) القيام بزيارات لمختلف المختبرات لمدد قصيرة من أجل اكتساب الخبرة في المجالات ذات الصلة الوثيقة بالموضوع يعتبر ذا منفعة عظيمة، وكذلك حضور المؤتمرات ليبقى المتخصصون في التحام بالتطور العالمي.

هذا ويجب أن يُجمَّع تنظيم هيئة العلميين في فرق ذات برامج أبحاث مختلفة. وينبغي تفصيلياً أن يكون لدى قواد المجموعات خبرة عدة سنوات في بحوث ما بعد الدكتوراه بمؤسسات علمية معروفة (جامعات جيدة التجهيز أو مراكز معجلات). ويجب أن تحتوي مجموعة تجريبية نموذجية - في الطبيعة النووية مثلا - على بضعة (٦ - ١٢) افراداً، اثنين من الاعضاء يحملون درجة الدكتوراه، والعديد من طلاب الدراسات العليا على مستويات مختلفة بدرجات البكالوريوس وفني واحد أو اثنين متخصصين في الميكانيك والالكترونيات. وتدريب طلاب الدراسات العليا من ناحية أخرى يجب أن يتبع كذلك خططاً فردية، وأن يتضمن مناهج رسمية لطلاب دراسات عليا في مختلف الموضوعات في معهد البحوث، وأن يكون الاشراف عليه بواسطة أساتذة المعهد أو بالجامعات المحلية للطلاب. وفي هذا الصدد يكون ذا أهمية عظمى أن يعزز التعاون بين جميع مؤسسات البحوث والجامعات في نفس الدولة أو بين مجموعة من الدول المشاركة في مشروع المعجلات. ويعتمد الأمر دائماً على طبيعة وحجم المشروع تحت الاعتبار.

ومن ناحية أخرى ينبغي عمل برنامج للتطوير الطويل الأمد لنشاطات البحوث متضمناً:

أ) تدريباً أكاديمياً بمحاضرين زائرين ذوي تأهيل عالي.

ب) دعوة علماء زائرين وأساتذة زائرين للتضامن مع مجموعات البحوث لمدد زمنية محددة أو لمشروعات خاصة.

ج) نظام لمنح يُعطَى للطلاب والعلماء بالمختبر من أجل الدراسات واجراء البحوث بالخارج.

وكنتيجة للزيادة المتدرجة في نشاطات البحوث بالمختبر، مع المجموعات

المتسعة التي تكتسب خبرة أكثر وأكثر ، والبرامج الطموحة للتدريب المستمر لهيئة أعضاء الباحثين ولتطوير امكانات البحوث والتجهيزات ، سيتوفر الضمان لتطوير متآلف نحو معهد بحوث جيد التوازن ذي مستوى دولي مرتفع ، قادر على اقتناء برامج بحوث سريعة التطور في مدى متسع للمجالات .

ترجمة الكلمات والتعبيرات الفنية والعلمية*

«A»

Abandoned	يتخلى عن ـ يتنازل ـ يسلم
Abdomen	بطن ـ جوف
Abnormal	شاذ
Abnormality	شذوذ
Abort	يجهض ـ يوقف نمو ـ يضع حداً له قبل الأوان
Abrasion	الحك ـ الكشط
Accelerator	معجل
Accentuate	يحرك ـ يشكل
Access	مدخل ـ وسيلة
Accessible	سهل المنال ـ يوصل اليه
Accomplish	ينجز
Accountability	مسئولية ـ حساب (عن أعمال معينة)
Acquire	ينال ـ يكتسب ـ يتحصل على
Across	عبر ـ على ـ فوق

* تعتبر الترجمات المقدمة هنا اجتهادية من جانب المترجم ، بالاضافة الى المرجع التالي : المورد (قاموس انجليزي ـ عربي) ، تأليف منير البعلبكي ، دار العلم للملايين ـ بيروت ، (١٩٧٦) .

Actic	القطبية الشمالية
Adapt	يكيف - يهيء
Adiabatic	ثابت الحرارة - (لا يفقدها ولا يكسبها)
Adjacent	قريب - متاخم - مجاور
Administered	يعطي
Administration of (medicine)	تعاطي (دواء)
Advent	ظهور
Aggravate	يفاقم .. يجعل الشيء أسوأ أو أشد خطورة
Aim	يتوق - يسعى - يحاول - تهدف
Align	يصف
Alimentarius	الغذائية
Almost	تقريباً - غالباً - على الغالب
Already	قبل الآن - سابقاً - في الحال
Alternate	متناوب
Ambiguously	على نحو غامض
Amplitude	قيمة الذروة
Ancillary	مساعد - ملحق - اضافي
Angular	زاوية
Annular	حلقي
Anoxic	الناقص الأكسجين
Applicators	مناولات
Apply	يستعمل - يخصص الغرض معين - يطبق عملياً - يضع أو ينثر على
Area	مساحة - منطقة - رقعة
Arise	يرتفع - ينهض - ينشأ

Array	نظام ـ ترتيب مصفوف
Artificial	صنعي ـ اصطناعي ـ زائف ـ متكلف
As long as	ما دام
As soon as	حالما ، بقدر ما
Aseptic	مطهر ، معقم
Aspect	مظهر
Assembly	مجمع
Attach	يلحق ـ يترابط
Attenuation	تقليل
Attribute	يعزو ـ ينسب
Auspice	تكهن ـ نذير بخير
Auspices	رعاية
Auxiliary	احتياطي
Availability	اتاحة ـ تيسر
Avalanche	انهيار
Azimuth	السمث
Azimuthal	السمتي

«B»

Backstream (beam)	تيار خلفي
Badge	سمة ـ نوط ـ علامة مميزة
Baffle	جدار أو حاجز لمنع تدفق الغازات
Bang	الكمية
Bank (resistance)	صف (مقاومات)
Barley	شعير

Barrier	عائق ـ حاجز ـ حد
Base (vt.)	يبني ـ يؤسس
Basement	الدور التحتاني ـ الجزء الأسفل القاعدي
Beam	حزمة من الأشعة ـ أشعة
Bearing	مرتكز (أو كرسي) المحمل
Bed	فرشة ـ أساس ـ طبقة
Bending	ثني ـ التواء
Bias	نزعة ـ انحياز
Binding energy	طاقة الترابط
Biogenic	ناشىء بفعل الكائنات الحية
Blanket	دثار ـ غطاء
Blast	عصفة ـ انفجار
Blast furnaces	أفران عالية
Blended	يخلط (للموالفة)
Blob	فقاعة
Blocked	مسدود
Blow out	يصهر ـ يدفع ـ يدق
Bolt (vt., n)	مسمار مصومل ـ يثبت بمسمار مصومل
Bond	رباط
Booster	رافع ـ مصعّد ـ معزّز (للطاقة مثلا)
(e.g. Booster Synchrotron)	
Bounce	يرتد
Breakdown (potential)	الانهيار (جهد الانهيار)
Brightness (beam)	اللمعان

Brine	محلول ملحي
Build up	انشاء ـ اقامة ـ تعزيز ـ نمو
Bulk	حجم
Bump	ضربة ـ ورم ـ نتوء
Bumps	مطبات ـ ارتطامات ـ مهاوي
Bunch	يضم
Buncher	مجمّع
Bundle	حزمة ـ رزمة ـ صرة
Burst.	انفجار

«C»

Cabin	مقصورة
Calcined	مكلس ـ محمص
Cap (vt)	يعلوها ـ تتوج
Capture	يأسر
Carcinoma	سرطان ـ ورم سرطاني
Cardiac	متعلق بالقلب
Cargo	شحن
Carrier	حاملة
Cascade	متعاقبة (وحدات مثلاً) تعاقب
Cast	قالب مصبوب ـ صبة
Cased	مغمد ـ موضوع في صندوق
Catalysis	الحفز ـ مادة مساعدة
Catalyst	مادة حفازة
Catastrophic	فاجع ـ مأساوي

Category	طبقة ـ فئة ، صنف
Cavity	فجوة ـ تجويف
Cellar	حجرة تحت الأرض
Cellulose	مادة تولف ـ سلولوز
Characteristic	مميز
Charcoal	فحم ـ حطب
Charm	فتنة
Charmed	المفتون
Chop	يقطع
Chopp	مفرمة ـ قاطع
Chord	الموتر
Circulate	يمرر
Citrus Crop	محصول الاملاح
Clad	مغلف
Clamp	يربط ـ يمسك ـ يقمط
Class	صنف
Classify	يصنف ـ يبوب
Clip	يقبض ـ يمسك
Cluster	حشد ـ مجموعة
Coagulated	تجمد ـ تجلط
Coating	طلية
Coaxial	متحد المحور
Codes	اصطلاحات ـ مصطلحات
Coincide	يتزامن ـ يتطابق

Collaborate	يتعاون
Collapse	ينهار ـ يتقوص ـ يتداعى ـ يهبط
Collective	جمعي ـ متجمع ـ متراكم
Collide	يصطدم
Combine	يضم ـ يوحد ـ يتحد
Common	عادي ـ عمومي ـ مشترك ـ عام ـ شائع
Compact	متجمع ـ مدمج ـ متضام
Complementary	متممة
Complex	مركب ـ مجمع
Concentrate	مركز
Concentric	متراكز ـ متحدة المركز
Concept	ظن ـ تصور ـ رأي
Concern	يتعلق بـ
Concerned	قلق ـ مهتم ـ معنى ـ مشغول
Condensate	متكثف ـ نتاج التكثيف
Condensed	مكثف
Conductivity	المتوصلية ـ الايصالية
Conduit	قناة ـ انبوب (لوقاية الاسلاك الكهربية)
Confine	يقيد ـ يحبس
Confirm	يؤكد ـ يثبت ـ يعزز
Conjunction	التحام
Consequently	ومن ثم ـ وعليه ـ وبناء عليه
Considerable	جدير بالاهتمام ـ جسيم ـ ضخم ـ هام
Constrain	يلزم ـ يغصب ـ يضطر
Constraint	ارتباك ـ اكراه ـ اضطرار ـ اجبار ـ تقييد ـ حبس

Contamination	تلوث
Content	محتوى ـ مضمون
Contrast	التغاير ـ التباين
Controversial	جدلي ـ بحثي
Convection (heat convection)	الحمل (الحمل الحراري) (انتقال الحرارة من جزء الى آخر)
Convenient	ملائم ـ مناسب ـ موافق
Conventional	اصطلاحي ـ عرفي
Convex	محدب
Coolant	مبرد
Cope with (vt.)	يتغلب على (يجاري)
Corona	اكليل
Correlation	علاقة متبادلة
Corresponding (cases)	المتناظر
Corresponding to	المتطابق . . . الموافقة لـ . . المناسبة لـ .
Corrode	يصدأ ـ يتأكسد
Corrosive	أكّال
Counteract	يضاد ـ يعادل ـ يبطل ـ يحايد
Coupled	مزدوج ـ مقرن ـ متقارن
Crack	يتصدع ـ ينشق
Crate	صندوق شحن
Crater	هوة ـ حفرة انفجار
Crosslinking	ترابط متعارض
Crude	فج ـ نييء ـ خام

Cruiser	طرادة
Crust	قشرة ـ أديم الأرض
Cryo	تبريد شديد
Cryostat	حالة التبريد الشديد
Crystallography	علم البلوريات
Culminate	يبلغ أوج الذروة
Culmination	أوج ذروة
Cusp	قرنة
Cyclic	دوري

«D»

Debuncher	مفرّق
Decade	عقد (عشر سنوات)
Decay	انحلال ـ ينحل ـ يضمحل
Defect	عيب ـ خلل ـ نقص
Defective	معيب ـ مختل ـ ناقص
Deficient	ناقصة ـ ضعيفة
Deficit	عجز
Definite	محدد ـ واضح ـ لا لبس فيه
Definitely	على نحو محدد أو واضح ـ بلا ريب
Deflect	يحرف . . ينحرف
Deliver	يولد
Demonstrate	يظهر بوضوح ـ يقيم الدليل على ـ يبرهن
Depleted	المستنفز ـ المستنفد
Depletion	استنفاد ـ افراغ

Deposit	يرسب ـ يترسب
Deposits	ترسيبات (ودائع)
Depression	انخفاض ـ ضعف
Derived	يشتق ـ يستنتج ـ يستمد
Detach	يفصل ـ يعزل ـ ينزع
Detect	يكتشف ـ يستبين
Detector	كاشف ـ مستبين
Determinant	محدد ـ عامل محدود أو مقرر ـ حاسم
Detrimental	مؤذي
Development	نمو ـ توسيع ـ تطوير ـ تنمية ـ انماء ـ نشوء
Deviate	ينحرف
Devise	يخترع ـ يدبر
Devote	يكرس ـ يخصص
Diagnosis	تشخيص
Diagnostic	تشخيصي
Diagram	رسم تخطيطي
Digital	ترقيمي
Digitise	ترقم
Dimensions	أبعاد ـ حجم
Discard	ينبذ
Disinfect	يطهر
Disintegrated	يحل ـ يحطم ـ ينحل ـ يتحطم ـ يتفسخ
Dismantle	يفك ـ يجرد ـ يعري
Dispel	يبدد المخاوف ـ يطرد

Disperse	يشتت ـ ينثر
Displace	يزيح
Displacement	ازاحة
Disrupt	يمزق
Disseminate	يبث
Dissociation	فصل ـ انفصال
Dissolve	يذيب ـ يفتت ـ ينخل
Disturb	يقاطع ـ يعوق ـ يزعج ـ يقلق ـ يشوش
Diurnal	يومي
Diverge	يتعرج ـ ينحرف ـ يتشعب
Divert	ينحرف ـ يحول
Domain	ميدان ـ ملكية
Doppler effect	ظاهرة دوبلر
Dormant	ساكن ـ مسبت
Downstream	في اتجاه مجرى (النهر)
Dramatic	مثير
Drastic	عنيف ـ متطرِّف
Dredged	مجروف
Drift	انسياق ـ تدفق
Dumped	يتكوم ـ يتكدس ـ يفرغ
Duty (cycle)	دورة شغل

«E»

Ebb (vt. n)	ينحسر ـ يتدهور ـ جزر البحر
Eddy	دوامة ـ تيار معاكس

Edge	حافة ـ حرف
Effective	فعال ـ مؤثر ـ رائع
Efficient	فعال ـ كفي
Effluence	فيض ـ انبعاث ـ خروج
Effluent	فياض ـ منبعث ـ خارج
Efflux	انبجاس
Eject	يقذف ـ يخرج ـ يلفظ
Elaborate	يطور ـ يفصل ـ يوسع ـ يحكم ـ يتقن
Elastic	مرن ـ مطاط
Electrode	قطب كهربائي
Electrolysis	التحليل بالكهرباء ـ لا فلزية ـ حامضية
Electronegative	سالب الشحنة الكهربائية
Electrostatic	الكتروستاتي ـ استاتي كهربائي
Elementary	أولي ـ ابتدائي
Eliminate	يزيل ـ يقصي ـ يحذف
Elucidate	يوضح ـ يشرح
Elusive	محير ـ مراوغ
Embeded	راسخ ـ مطمور
Emerge	ينبثق ـ يبزغ ـ ينشأ ـ يظهر للعيان
Enfusion	المستحلب ـ الطبقة الحساسة
Encapsulate	يكبسل ـ يغلف
Enclose	يكتنف ـ يحوي
Enclosure	تطويق ـ طرد ـ سياج ـ تسييج
Energetic	نشيط ـ فعال ـ طاقي
Energize	يزود بالطاقة

Engagement	ارتباط
Engine	وابور ـ محرك
Enhance	يعزز
Enumerate	يعدد ـ يسرد ـ يحصي
Enveloppe	غلاف
Epi	فوق
Equation	معادلة
Equator	خط الاستواء
Eradicate	يجتث ـ يقطع وابر
Essentially	جوهرياً ـ أساسياً
Establish	يقيم ـ يوطد ـ ينشيء ـ يؤيد
Evaluation	تقييم ـ تقدير
Eventual	مترتب على
Evolved	نشأ ـ تطور ـ تقدم
Evolution	تحول ـ نمو ـ تطور ـ تقدم ـ نشوء
Excavate	يحفر ـ ينقب
Excite	يثير ـ يستثير
Excited	مثار ـ مستثار
Exciting	مثير
Exhale	يزفر ـ يطلق بخاراً
Exhibit	يظهر ـ يعرض ـ يصور
Expenditure	انفاق ـ استنفاد مصروفات
Experience (vt.)	يلاقي ـ يعاني ـ يقاسي ـ يكتشف
Explore	يستكشف ـ يتحرى
Exponential	أسي ـ دليلي

Extend	يمد ـ يبسط ـ ينشر
Extensive	شامل ـ واسع
Extract	يستخلص
Extrapolate	يقدر استقرائياً

«F»

Fabric	قماش صنعة
Fabrication	تصنيع ـ تجميع
Familiar	مألوف
Fashion	زي ـ طريقة ـ ابتكار ـ شكل ـ صورة ـ هيئة ـ كيفية ـ غرار
Favorable	مرضي ـ ايجابي ـ مؤاتي
Feedback	تغذية مرتدة
Fiber	مادة مصنوعة من ألياف ، ليف أو نسيج عضلي
Fins	زعانف
Flange	شفة
Flash	وميض
Flashover	قفز الوميض
Flask	قارورة ـ صندوق القوالب
Flat	منبسط ـ مسطح
Flavor	نكهة
Floor	أرضية ـ أرض الحجرة
Florescence	أزهار (النبات)
Flow (vt. n)	جريان ، سريان ، يجري ، يسيل
Fluorescence	يتفلور

Flux	تدفق
Foam	مطاط رغوي
Fold (3 - fold)	ضعف ـ عدد (زمر ثلاثة أجزاء)
Follow	يتبع ـ يعقب ـ يتعقب ـ يلاحق
Formidable	مرعب ـ هائل
Fossil	حفري ـ مستخرج من الأرض
Fractional	كسرى ـ جزئي ـ ضئيل
Fragment	كسرة
Frequencey	تكرار ـ تعدد بتوالي
Fresh	عذب ـ طازج ـ نقي
Fringing (field)	انبعاج
Fuel assemblies	مجمعات الوقود
Function	يؤدي الوظيفة (دالة ـ وظيفة)
Further	علاوة على ذلك ـ اضافي ـ آخر ـ الى حد أو مدى

«G»

Gain	زيادة ـ كسب
Galaxy	حجرة ـ كوكبة
Gantry	يسند
Gasket	(الخشتق) الحلقة
Gauge	مقياس
Gear	عدة ـ جهاز
General	عام ـ شائع
Genetic	جيني ـ أصلي ـ تاريخي ـ تطوري ـ خاص بعلم الوراثة

	أصل شيء أو تكونه الخصائص
Genetics	الوراثية ـ علم الوراثة ـ التركيب الوراثي
Genuine	أصلي ـ نقي ـ خالص
Getter	مزيل للغاز
Girder	عارضة
Gland	غدة
Glow	وهج
Govern	تتحكم في ـ تهيمن ـ تسيطر
Gradient	درجة الميل أو التحدر
Grafting	تطعيم
Grant	يمنح
Grid	يصقل
Guide	يوجه ـ يرشد

«H»

Harmonics	التوافقيات
Harness	يتحكم في (n أحزمة ـ مجموعة متكاملة)
Hazard	مصدر خطر ـ مجازفة ـ مخاطرة
Hexa	سداسي
Hoisting	رفع
Homogenous	متناسق التكوين
Hoop	طوق
Hover	يحوم
Hurled	يطوّح ـ يراشق

Identical	متطابق
Identify	يطابق ـ يماثل ـ يعين
Immiscible	غير قابل للامتزاج (لا يمتزج)
Implant	يغرز ـ يغرس
Impressive	مؤثر ـ مثير للاعجاب
Impulse	الدفع ـ دفعة ـ نبضة
Inaccessible	يصعب الوصول اليه
Incorporate	يدمج ـ يوحد ـ يضم
In contact	ملامس
Index	فهرست ـ مؤشر ـ علاقة ـ دلالة ـ دليل
Induce (vt.)	يحث
Induced	مستحثة
Inertial	جمودي
Inevitable	محتم ـ حتمي
Infer	يستنتج ـ يستدل
Infest	يغير على
Infrequent	نادر ـ غير غالب
Ingestion	استيعاب
Inhalation	استنشاق
Inherent	متأصل ـ ملازم
Inheritance	وراثة
Initial	ابتدائية
Initiator	بادىء

Inject	يحقن ـ يدخل
Innovation	ابتداع ـ تجديد ـ ابتكار
Input	زاد
Input power	تزويد للطاقة
Insertion	ادخال ـ ايلاج
In situ	في موضعه الأصلي الطبيعي
Insoluble	غير قابل للذوبان
Install	يقيم
Instrumentation	علم تطوير الآلات ـ صنع الآلات واستخدامها
Intensity	قوة ـ كثافة ـ حدة ـ شدة
Intensive	كثيف ـ شديد ـ مركز ـ مقوّ ـ مشدّد
Interchangeable	قابلة للتبادل
Interesting	مشوق ـ مهم ـ مفيد ـ مرغب
Interface	سطح بيني
Interim	فترة ـ فاصل ـ في أثناء ـ مؤقت
Interlace	يترابط ـ يثبت بالخيوط
Interlock	تشابك ـ توشح
Interplanetary	بين الكواكب
Interrogate	يقيم علاقة متبادلة مع ـ يتداخل
Interrupt	يقاطع ـ يعوق
Interval	فاصل ـ فترة فاصلة ـ فرجة
Intimate	مفصل ـ عميق ـ أساسي ـ جوهري
Invade	يجتاح ـ يعتدي على
Inventory	قائمة ـ الموجودات
Investigate	يتحرى ـ يفحص

Involve	يستخدم
Involved	متضمن ـ محاط بـ
Involvement	ارتباط ـ شمول ـ تورط ـ انهماك ـ استغراق ـ اقتضاء ضمناً
Iris	حدقة
Isochronous	متساوي الزمن ـ متساوي الديومة
Isodose	متساوية الجرعة
Isotopic	موحد الخواص ـ متساوي الخصائص في جميع الاتجاهات

«J»

Judge (vt.)	يحكم على ـ يقدّر
Justify	يبرر ـ يسوغ ـ يثبت

«K»

Kettle	قدر
Kinematics	علم الحركة المجردة
Kinetic	حركية
Knot	عقدة (ميل بحري)

«L»

Labyrinth	تيه ـ ورطة
Laminated	مؤلف من رقائق مضغوطة
Last (vt.)	يدوم
Latitude	خط عرض
Lattice	شبيكة ـ حصيرة
Launching	أنزلت (سفينة)

Layout	تخطيط ـ تصميم ـ مبنى
Leaching	(استخلاص المركب المعدني بالاذابة في سائل مذيب)
Lesion	ضرر ـ أذى ـ آفة
Limitation	تحديد ـ تقييد ـ عجز ـ قصور ـ حد ـ قيد
Link	يزاوج ـ يربط ـ يرتبط
Literature	مادة مطبوعة (منشورات ـ دوريات)
Localisation	مركزة ـ تمركز
Locate	يعين موضع
Locus	مكان ـ موضع ـ محل
Loop	حلقة ـ عروة
Loosely	بغير إحكام
Lumps	ركم غير منتظمة الشكل

«M»

Macroscopic	عياني ـ يرى بالعين المجردة
Maintain	يتحمل ـ يداوم ـ يحتفظ ـ يصون ـ يؤكد
Malefactors	آثمون ـ مجرمون
Manoeuver	يدبر ـ يناور
Marked	ملحوظ ـ مشهور
Mass defect	النقصان الكتلي
Massive	ثقيلة
Match	يضارع ـ يباري ـ يطابق ـ يوافق ـ يضاهي
Mating	مرافقة ـ مقارنة
Maze	حيرة ـ ورطة ـ تيه
Meantime (in the)	في غضون ذلك ـ في نفس الوقت

Mechanism	طبيعة تركيب الأجزاء ـ ميكانيكية ـ آلية ـ تقنية ـ المذهب
Median	المتوسط
Membrane	غشاء
Metabolism	ايض (التغيرات المستمرة الحادثة في الخلايا الحية)
Meteorites	شهب
Metastatic	نمو انبثاقي
Microscopy	اجهارية
Midplane	مستوى المنتصف
Migration	هجرة ـ نزوح ـ ارتحال
Mild	معتدل
Mill	طاحونة
Mineral	معدنية
Mining	تعدين ـ استخراج الخامات
Minor	ثانوي ـ غير هام ـ غير خطير
Mode	صيغة ـ شكل ـ موديل
Model	مخطط ـ مجسَّم ـ نموذج
Modulation	تعديل
Module	وحدة
Momentun	كمية التحرك
Monitor	يختبر ـ يراقب ـ يستنبىء ـ يتحقق من
Monitoring	استنباء
Mortar	جرن ـ ملطم المونة
Motivate	يحث ـ يحرض
Mound	هضبة ـ كومة ـ ركام

Mount	يقيم ـ يرفع ـ يعلي
Multiplex	مضاعف ـ متعدد
Multplication factor	عامل التضاعف
Multiplier	مضاعف
Mutation	التحول ـ التغير الفجائي
Mutual	تبادلي ـ مشترك

«N»

Net	صافي ـ نهائي
Novel	جديد ـ حديث العهد
Nucleon	نويّة
Nucleonics	النوويات
Nucleus	نواة (نويات ـ نوى)
Nuclide	نويدة ـ (الجمع : نويدات)
Nutritional	غذائية

«O»

Obscure	غامض ـ مبهم
Obtainable	ممكن احرازه أو الحصول عليه
Obvious	واضح ـ جلي ـ بيني
Occasionally	أحياناً
Occluded	يمتص
Occuring (naturally)	متواجد (طبيعة التواجد) متواجد طبيعياً
Offset	يحايد ـ يوازن ـ يعادل
Often	كثيراً ما ـ طالما ـ مراراً

Opacity	الكُمّدة ـ اللاإنفاذية
Opaque	أكمد اللون ـ غير منفذ
Optical	بصري
Optimum	الأمثل ـ الأفضل
Orally (administered)	بالفم (يُعطى)
Orbit	مدار ـ فلك
Organism	كائن حي
Oriented	يكيف وفق الظروف ـ يوجه
Originate	يبدأ ـ ينشأ
Osmosis	الازموزية ـ التناضجية
Otherwise	بطريقة أخرى . والا (من نوع آخر)
Outdoor	خلوي ـ في الهواء الطلق
Outgrow	ينمو بسرعة فائقة ـ يفوقه في النمو
Outline	مختصر موجز
Output	سعة ـ مردود ـ نتاج ـ خرج ـ قدرة ـ محصول ـ انتاج
Overlie	يلقي على سطح
Overseas	فوق البحار

«P»

Pace (vt., n)	يخطو ـ يسبق ـ يتقدم خطوة
Packet	ربطة ـ حزمة ـ رزمة
Papyrus	نبات البردى
Paradox	ظاهري التناقض
Parasitic	طفيلي
Parity	تماثل ـ تكافؤ ـ تساو ـ شبه

Particular	خاص (ومعاني أخرى حسب الجملة)
Passive	غير فعال ـ سلبي
Pattern	نموذج ـ نمط
Peat	الخث (أردأ أنواع الفحم العضوي)
Pebble	حصاة ـ حصى
Pellets	كريات
Pelvic	حوض (له علاقة بالحوض)
Penetrate	يخترق
Permeable	منفذ
Permeate	ينفذ ـ يخترق ـ يتخلل
Permitivity	المنفذية الكهربائية
Persist	يثابر ـ يداوم ـ يعزم ـ يستمد
Pests	حشرات مؤذية
Phage	الملتهم ـ آكل
Pharmaceuticals	مستحضر صيدلي
Phase	وجه ـ طور ـ دور ـ مظهر ـ جانب ـ حالة ـ صورة
Photo	ضوئي
Photography	تصوير ضوئي
Photons	فوتونات (وحدات الكم الضوئية)
Pick up (electode)	لاقط (قطب)
Pilot	يسترشد ـ يوجه ـ يقود
Piston	كباس
Pit	حفرة ـ فجوة
Pituitary Gland	الغدة النخامية

Plane	سطح ـ مستوى
Plant	وحدة صناعية ـ مصنع
Plate	لوح
Plug	صمة ـ سدادة
Plot	رسم بياني
Polar	قطبي
Polarity	القطبية
Ponder	وزن ـ ثقل
Pool	بركة
Popular	شائع ـ رائج ـ محبوب
Port	فتحة ـ منفذ
Portable	نقالي سهل الحمل
Portability	سهولة الحمل
Possess	يمتلك ـ يحوز ـ يقتني
Post (vt. n)	يذيع ـ ينشر ـ يعلن ـ يلصق اعلاناً على الجدار ـ عمود
Potential	كامن
Power	قدرة
Powered	ممد ـ مدار بقدرة آلية
Practice	يمارس ـ يزاول ـ يطبق
Preaccelerator	معجل أمامي
Precede	يسبق ـ يفوق ـ يعوله
Precepitated	مترسبة .
Predominate	يسود ـ يسيطر ـ يهيمن ـ يتغلب
Preferential	تفضيلي
Preservative	واق

Prevail	يسود ـ ينتشر
Probe	مسبار
Proceed	يواصل ـ يتابع
Process	يتقدم ـ يعامل
Procure	يدبر ـ يحصل على
Profile	صورة جانبية
Progressively	تقدمياً ـ تدرجياً ـ تصاعدياً
Promising	واعد ـ مرجو ـ ينتظر له مستقبل مرموق
Promote	يروج ـ يعزز ـ ينشىء
Prompt	فوري
Propagate	ينشر ـ يذيع ـ ينقل ـ يمتد ـ يتوالد ـ يمد
Propel	يدفع ـ يحث ـ يسير
Propeller	مروحة
Prospect	يكتشف
Proto	بدئي ـ بادىء ـ أول
Prototype	نموذج أصلي
Provide	يمد ـ مزود
Puff	نفخة ـ هبّة ـ انفجار
Punch	يثقب
Pursue	يسعى

«Q»

Quarry	محجر
Quench (vt.)	يطفىء ـ يروي
Quite	الى حد بعيد ـ تماماً

«R»

Race	سباق
Radical	جذري ـ متطرف ـ منشق
Radiotherapy	العلاج بالأشعة
Random	كيفما اتفق ـ عشوائي ـ جزافي ـ اتفاقاً ـ بالصدفة
Range	مدى ـ نطاق ـ مساهمة أو رقعة ممتدة
Rare earths	العناصر الأرضية النادرة
Rated (Load)	الحمل المقدرة
Rather than	مفضلا عن
Reactivation	اعادة تنشيط
Readily	باستعداد ـ حالا
Reagent	كاشف
Reap	يحصد ـ يجني
Rear (vt.)	يربي ـ يحتضن
Reason	مبرر ـ (مستنبط)
Recorder	يسجل
Recovery	استعادة (اقامة)
Recurrence	التجاء ـ عودة ـ تكرار
Recruit	يمد ـ يعزز ـ يجند
Recycled	يعاد تحريرها في دورة ـ يعاد ادارتها في دورة
Refinery	معمل تكرير
Refuel	يتزود بالوقود
Regard (with regard to)	فيما يتعلق بـ

Regeneration	استرجاع ـ تجديد (اعادة توليد)
Register	يدون
Regulations	قاعدة ـ نظام ـ قانون ـ تنظيم
Relaxation	تراخ ـ استرخاء
Relay	مرحّل
Released	سيب ـ أطلق ـ حرر ـ أفرج عنه
Relevant	مناسب ـ وثيق الصلة بالموضوع
Reliable	يعول عليه
Reliability	عول ـ العول : كون الشيء جديراً بأن يعول عليه
Remarkable	غير عادي ـ رائع ـ جدير بالملاحظة ـ استثنائي
Repel	يصد ـ يرد
Report	ينقل (خبراً . . .) تقرير
residual	متبق ـ متخلف
Residue	متخلف ـ فضالة ـ بقية
Resins	راتينجات
Resolution	ثبات ـ انحلال ـ قرار
Resolving power	قدرة التبين
Resonance	رنين
Resonant	رنان ـ طنان
Rest mass	كتلة السكون
Restore	يعيد ـ يرجع ـ يعوض
Resultant	ناتج ـ ناشيء ـ ناجم ـ نتيجة
Retain	يحتفظ بـ ـ يستبقي ـ يحتجز
Retardant	معوق ـ مقاوم
Review	يستعرض

Ridge	قمة ـ متن ـ سلسلة الضلع
Rigid	صلب
Ripples	تموجات
Rocket	صاروخ
Rye	نبات الجاودار

«S»

Safety	أمان ـ أمن ـ سلامة ـ مأمن
Sake	سبيل ـ مصلحة ـ قصد ـ غرض
Sample (vt.)	يختبر
Sampling	أخذ العينات واختبارها
Satellite	تابع ـ قمر
Satisfactory	مرضي
Scale	تدريج ـ مقياس ـ حرشفة
Scanning	المسح
Schematic	تخطيطي
Scheme	مخطط ـ برنامج ـ مشروع ـ خطة
Scintillation	ومضية ـ عداد الومضات
Scope	مجال ـ مدى ـ غرض
Scrap	الفتات ـ النفاية ـ الفضلة
Scrapper	محك ـ مجرفة
Scratch	خدش
Screw-Wormfly	ذبابة الدودة اللولبية
Scrolls	رقع ملفوفة
Scrub	يحك

Scrubbing	عملية غسل الغاز
Seal	محكم غلق ـ مانع التسرب
Seam	وصلة اللحام ـ وصلة الالتئام
Section	قسم ـ مقطع
Sector	قطاع
Seeds	بذور
Selsyn (motor)	ذاتي التز من (محرك)
Sense	من بعض النواحي ـ معنى ـ ادراك ـ بمعنى من المعاني
Siptem	الحجاب ـ الحاجز ـ الغشاء الفاصل
Sequence	تعاقب ـ تتابع ـ تسلسل
Servo	مؤازر
Set up (vt,n)	يؤسس ـ يحدث ـ بنية ـ تركيب ـ مشروع
Several	عدة ـ بضعة
Shaft	عمود
Sheath	غلاف
Shed	تظلل
Sheet	صفحة
Shell	غلاف ـ قشرة
Shield	درع ـ وقاء ـ حجاب واق
Shielding	دراء ـ حجب ـ تحجيب ـ عصمة ـ حماية
Shim	رفادة ـ شقفة
Short-circuit	قصر الدائرة
Show	يرى ـ يعرض ـ يظهر ـ يشير الى ـ يبين
Shower (electronic)	وابل من

Significance	مغزى ـ فحوى ـ أهمية
Simultaneous	معاً في وقت واحد
Sink	غور ـ منخفض ـ بالوعة
Situated	واقع ـ كائن
Sketch	رسم تخطيطي
Slab	شريحة ـ لوح
Slag	خبث
Smasher	محطم
Smear	لطخة ـ مسحة
Soak	يتشرب ـ ينقع
Soil	تلوث ـ تربة
Sole	وحده ـ منفرد
Solid	مصمت
Solute	ذائب
Solvent	مذيب
Somehow	بطريقة ما
Somewhat	الى حد ما
Spaced	متباعدة
Spallation	شظية
Span (vt,n)	الباع ـ يمتد فوق
Spare	يبقي على ـ يستثني
Species	صنف ـ نوع
Specific	نوعي ـ محدد ـ معين ـ دقيق
Specify	يعين ـ يخصص ـ يقدر

Spectacular	مثير للاعجاب ـ مذهل
Speculation	تأمل ـ تخمين ـ تفكر
Spill	يسكب ـ يريق
Spindle	عمود
Spleen	طحال
Split	يشق ـ يغلق ـ يمزق ـ يشطر
Sponsor	يكفل ـ يرعى .
Spontaneous (ly)	عفوي ـ ذاتي (اختياريا)
Spray	يرش ـ يرذ
Spread (energy)	عرض ـ مدى
Stack	ركام ـ صفوف
Stagger	يمايل ـ يتردد ـ يرنح
Standard	معيار ـ قياس ـ معياري ـ قياسي ـ ذو قيمة باقية معترف به
Steady	باطراد ـ ثابت ـ راسخ ـ مستقر
Sterile	معقم ـ عاقر
Stimulate	يحفز ـ يثير
Stimulator	منبه ـ محرك
Stray	الشرود ـ التشوش
Stream	مجرى
Stress	اجهاد
Stringent	قاس
Strip	شقة
Stripper	مجرد (الأيونات)
Submerge	ينغمر ـ يغوص

Submerged	غارق ـ مغمور
Subsequent	لاحق ـ تال
Subsidiary	اضافي
Substantial	قوي ـ هام ـ مادي ـ حقيقي ـ أساسي ـ هام ـ ضخم
Subtle	رقيق ـ دقيق ـ ماكر ـ خبيث ـ مصقول
Succeeding	المتتابعة ـ المتتالية
Successor	متوالي ـ متعاقب (وريث)
Sulphide	كبريتيد
Superconductive	مفرط الموصلية
Superconductivity	فرط الموصلية
Superconductor	المفرط الموصلية
Supercooled	مفرط البرودة
Superimpose	يركب على ـ يضاف الى
Superior	أفضل ـ متفوق
Supplementary	اضافي تكميلي
Supersonic	سرعة فوق صوتية
Suppress	يقمع ـ يخمد ـ يوقف ـ يكبت ـ يكتم
Suppression	قمع ـ اخماد ـ كبت ـ ايقاف
Surge	موجة اندفاعية
Survey	يمسح ـ يعاين ـ يتقصى
Suspect	يرتاب ـ يشك
Sustained	مداوم
Sweep (vt.,n)	اندفاع ـ يكتسح ـ يجرف
Switching (magnet)	تحويل (مغناطيس)
Systematic	نظامي ـ منظومة ـ ترتيبي

Symbolize	يرمز الى
Symmetrical	متماثل ـ متناسق
Synchronous	متزامن ـ متواقت ـ تزامني ـ تواقتي

«T»

Tandem	ترادفي
Tank	خزان ـ صهريج
Task	مهمة ـ عمل شاق
Technique	أسلوب تقني
Temperate	معتدل
Terminal	طرف ـ نهاية
Terminology	مصطلح ـ عبارة ـ تعبير
Terrain	أرضية
Text	نص ـ متن ـ متن الكتاب
Textile	نسيج
Therapeutic	طبي ـ علاجي
Threshold	حدّ
Throat	حلق
Throughout	في كل مكان ـ طوال
Thyroid	درقية
Timely	في حينه ـ في الوقت المناسب
Tissues	أنسجة
T.N.T.	ثالث نيتريت التولوين
Tolerance	التفاوت المسموح ـ احتمال ـ القدرة على الاحتمال

Tomography	الرسم السطحي أو الطبقي (بأشعة إكس)
Ton	طن أمريكي
Tonnage	الحمولة بالطن ـ طنية
Torque	عزم
Tough	متين ـ صارم ـ حازم
Toxic	سام
Trace	أثر ـ يستشف ـ يقتفي الأثر ـ يكتشف
Tracer	مقتفي
Tracer Element	عنصر استشفافي
Track	يتتبع ـ مسار ـ أثر ـ تعقب
Trail	أثر
Trailer	مقطورة
Train	ذيل
Trajectory	مسار منحني
Transient	زائل ـ عابر ـ قصير الاقامة
Transit	عبور ـ مرور
Transition	انتقال ـ تحول
Transmutation	تحويل عنصر الى آخر
Transverse	مستعرض
Trend	نزعة ـ اتجاه ـ منحاة
Tripod	حامل ثلاثي القوائم
Trough	غور أو منخفض طويل ضيق (الموجة)
Truck	عربة نقل
Tumour	ورم

«U»

Ultimate	قمة ـ ذروة ـ أقصى ـ نهائي
Ultrahigh	فوق العالي
Undergo	يجتاز ـ يتحمل ـ يقاسي ـ يخضع
Underlie	يقع تحت
Uniform	منسق ـ منتظم ـ متماثل
Unique	وحيد ـ مزيد ـ فذ ـ استثنائي
Upgrade	يصعد
Upstream	ضد التيار
Uptake	مأخذ
Urban	متحضر ـ متمدن
Urinalysis	تحليل البول
Urge	يستحث ـ يحفز
Utilize	يفيد من ـ ينتفع بـ

«V»

Validate	يؤيد ـ يثبت ـ يجعله شرعياً
Vane	ريشة (مروحة)
Variety	تنوع ـ تشكيلة
Various	متعددة ـ عديدة
Vegetation	نبت ـ استنبات
Verify	يتحقق من ـ يؤكد صحة ـ يثبت
Versatile	متعدد الاستعمالات
Version	نسخة معدلة
Versus	مقابل ـ ازاء

Vinyl	ڤينيل (بلاستيك)
Virtual	تقديري ـ افتراضي
Vivid	زاهي ـ باهي ـ نشيط
Void	فضاء ـ خال ـ لاغ
Voids	فراغات
Voltage	الفلطية ـ الجهد ـ القوة المحركة الكهربائية

«W»

Wake	الاثر الذي يخلفه جسم متحرك
Waste heat	حرارة متبددة
Web	نسيج
Wedge	وتد
Wholesomeness	الصلاحية
Worthwhile	ذو شأن ـ جدير بالاهتمام
Wrapper	لفافة ـ غطاء ـ دثار

«Y»

Yet	بعد ـ حتى الآن ـ فوق ذلك ـ علاوة على ذلك ـ أيضاً ـ حتى ـ بل
Yield	نتاج

«Z»

Zigzag	خط متعرج

الثمن : ٢٥ل.ل. أو مَا يعَادِلهَا